Aus der Universitäts-Augenklinik Tübingen
Direktor: Professor Dr. H. Harms

Bestimmung achromatischer Schwellen für verschiedene Spektrallichter

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
WILHELM NOLTE
aus Göttingen

7190
1962

Aus der Universitäts-Augenklinik Tübingen
Direktor: Professor Dr. H. Harms

Bestimmung achromatischer Schwellen für verschiedene Spektrallichter

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
WILHELM NOLTE
aus Göttingen

Dekan: Professor Dr. Karl Brecht

Berichterstatter: Professor Dr. Heinrich Harms

Fotodruck PRÄZIS · Tübingen

Inhaltsübersicht

A. Einleitung 1

I. Aufgabe der Farbperimetrie 1

a) Achromatische Empfindlichkeit
b) Chromatische Empfindlichkeit
c) Photochromatisches Intervall

II. Topographische und Statische Perimetrie 3

B. Literatur zum Thema 4

I. Allgemeines 4

a) Intensität des Reizes
b) Definition der Farbe
c) Umfeld

II. Die Untersuchungsmethoden von Wentworth 6

III. Monjé 8

IV. Der klinische Wert der Farbperimetrie .. 8

C. Eigene Untersuchungen 10

I. Apparat 10

a) Prüfpunkt
b) Umfeld
c) Energiemessung

II. Untersuchungsmethode 16

a) Eichung des Umfeldes und des Prüfreizes
b) Adaptation der Versuchsperson
c) Perimetrieren des blinden Flecks
d) Prüfung des Gesichtsfeldzentrums
e) Prüfung der Gesichtsfeldperipherie

III. Ergebnisse 21

a) Allgemeines
b) Helles Umfeld
c) Mittleres Umfeld
d) Dunkles Umfeld
e) Zusammenfassung der Ergebnisse

D. Besprechung der Ergebnisse 29

I. Bewertung der Ergebnisse 29

II. Einfluß der Adaptation 30

III. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren 34

IV. Schlußbetrachtung 37

E. Zusammenfassung 39

F. Literatur 40

G. Anhang mit den Abbildungen 46

A. Einleitung

I. Aufgabe der Farbperimetrie

Seitdem Troxler (1804) und Purkinje (1825) die Feststellung machten, daß die Netzhaut des menschlichen Auges für verschiedene Farben eine unterschiedliche Empfindlichkeit zeigt, beschäftigte sich eine große Zahl von Forschern mit der Frage, welche Faktoren auf die Farbempfindlichkeit der Netzhaut Einfluß nehmen und welche qualitativen und quantitativen Unterschiede gegenüber farbigem Licht innerhalb des Gesichtsfeldes vorliegen. Die Farbperimetrie untersucht die Empfindlichkeit der Netzhaut für bestimmte Farblichtreize unter definierten Versuchsbedingungen. Bei einer solchen physiologischen Untersuchungsmethode ist einem bestimmten Reiz eine bestimmte Reizantwort zuzuordnen. Eine Veränderung des Reizes führt zu einer Veränderung der Reizantwort. Die genaue Definition des Reizes ist also eine Grundbedingung zur Gewinnung verwertbarer Ergebnisse. Außerdem ist bei der Farbperimetrie die Art der Reizantwort zu berücksichtigen.

Je nach der Intensität eines farbigen Lichtreizes empfindet das Auge ihn achromatisch oder chromatisch.

a) Die Untersuchung der achromatischen Empfindlichkeit besteht in der Bestimmung der Reizintensität, die gerade zum Entstehen einer farblosen Lichtempfindung notwendig ist (absolute oder unspezifische Schwelle).

b) Die Reizintensität, die zur Erkennung der betreffenden Farbe notwendig ist, kennzeichnet die chromatische Empfindlichkeit (spezifische Schwelle).

Die Empfindlichkeit ist der Intensität des Schwellenreizes umgekehrt proportional.

c) Für die Differenz zwischen chromatischer und achromatischer Schwelle hat man den Begriff des photochromatischen Intervalls eingeführt.

Die Faktoren, die die Lage der Schwellen, bezw. die Ausdehnung der "Farbgesichtsfelder" beeinflussen, betreffen einmal den variablen Prüfreiz und zum anderen das während der Untersuchung konstante Umfeld. Der Lichtreiz ist gekennzeichnet durch die Prüfmarkengröße, die Intensität, die Wellenlänge und die Zeitdauer der Darbietung. Das gesamte Umfeld soll gleichmäßig hell (neutralweiß) sein, so daß der Reiz auf einen Rezeptorapparat trifft, der im Bereich der gesamten Netzhaut gleichartig beansprucht ist.

F e r r e e und R a n d unterscheiden bezüglich des Umfeldes zwischen der Leuchtdichte der Fläche, an welche das Auge adaptiert ist und derjenigen, welche den Prüfreiz unmittelbar umgibt, bezw. an welche die geprüfte Netzhautstelle adaptiert ist, wenn sie der Lichtreiz trifft. Die beiden Autoren fanden nämlich die Empfindlichkeit der geprüften Netzhautstelle dann am größten, wenn die Leuchtdichte, an die das Netzhautareal adaptiert ist, mit der Schwellenleuchtdichte des im Wechsel dazu angebotenen Farbreizes übereinstimmt.

Bei der heute vielfach verwendeten Projektionsperimetrie prüft man bei einer bestimmten gleichbleibenden Umfeldleuchtdichte, welcher der farbige Lichtreiz am Prüfort hinzugefügt wird.

II. Topographische und Statische Perimetrie

Um über die Farbempfindlichkeit verschiedener Netzhautareale Aufschluß zu gewinnen, kann man zwei Wege einschlagen.
Entweder geht man davon aus, daß die Netzhautperipherie weniger empfindlich ist als zentrale Netzhautbereiche, daß also ein für das Zentrum gefundener Schwellenreiz für die Peripherie unterschwellig ist. Während der Untersuchung muß das geprüfte Auge ständig die Perimetermitte fixieren. Man bewegt dann die Prüfmarke von der Peripherie so weit zum Zentrum hin, bis der Reiz gerade überschwellig ist und legt diesen Punkt im Gesichtsfeldschema fest. Wenn man dies in vielen Netzhautmeridianen wiederholt, erhält man als Ergebnis eine sogenannte Isoptere, eine beim normalen Auge mehr oder weniger kreisförmig um die Gesichtsfeldmitte verlaufende Linie, welche die Stellen gleicher Empfindlichkeit verbindet. Verschieden starke Reize bedingen Isopteren mit einem verschiedenen Abstand von der Gesichtsfeldmitte. Diese alte Methode der Gesichtsfeldprüfung wird heute als Topographische Perimetrie bezeichnet. Sie dient zur Bestimmung der Farbgesichtsfeldgrenzen.

Die Statische Perimetrie prüft die Empfindlichkeit einer beliebigen Netzhautstelle mit unbewegter Marke. Die zunächst unterschwellige Reizintensität wird dabei schrittweise solange gesteigert, bis der Prüfreiz sichtbar wird. Man prüft beliebig viele Punkte in einem Netzhautmeridian und verbindet die erhaltenen Schwellenwerte auf einem Diagramm zu einer Kurve, wobei die Exzentrizität der Netzhautstellen die Abszisse und die Schwellenintensität, nach unten zunehmend, die Ordinate darstellt.

Damit erhält man einen Schnitt durch den "Funktionsberg" der Netzhaut, dessen Lage durch den gewählten Meridian

definiert ist. Die statische Perimetrie hat den Vorteil, daß sie jede beliebige Netzhautstelle erfassen kann und aus Höhenlage und Form des "Profilschnittes" recht genaue Aussagen über den Funktionszustand der Netzhaut möglich sind. Geringe Veränderungen der Empfindlichkeit lassen sich für jeden geprüften Punkt direkt ablesen, während man sie bei der topographischen Perimetrie indirekt aus der Verlagerung der Isopteren erschließen muß. Es ist das Verdienst von S l o a n und H a r m s , die Methodik der statischen Perimetrie entwickelt und in die Klinik eingeführt zu haben.

Die vorliegende Untersuchung verwendet die Methode der statischen Perimetrie zur Bestimmung der achromatischen Schwellenenergien im horizontalen Gesichtsfeldmeridian für Spektrallichter verschiedener Wellenlängen bei verschiedenen Adaptationszuständen des Auges.

B. L i t e r a t u r z u m T h e m a

I. Allgemeines

In seinem Buch "Le champ visuel" hat D u b o i s - P o u l s e n die Entwicklung der Perimetrie bis zum Jahre 1949 zusammengestellt. In dem Kapitel über Farbenperimetrie sind die nach Meinung des Autors wichtigsten Arbeiten zusammengefaßt. Wir müssen wegen der großen Zahl im allgemeinen auf diese Zusammenstellung verweisen. Zum Thema "Achromatische Schwellen" wird die Arbeit von W e n t w o r t h als einzige ausführlich referiert. Diese Publikation ist eine der wenigen, auf die die vorliegende Untersuchung unmittelbar Bezug nehmen kann.

D u b o i s - P o u l s e n bewertet die von ihm referierten Arbeiten nach der Genauigkeit der physikalischen Definition der Versuchsbedingungen und der angebotenen Lichtreize.

a) Intensität des Reizes

In seinen Schlußbemerkungen zu dem Kapitel "Farbengesichtsfeld" schreibt D u b o i s - P o u l s e n :
"Jede Schwelle wird durch die Lichtstärke bestimmt, die man einer Prüfmarke geben muß, bis die erwartete Empfindungsqualität (chromatische oder achromatische Schwelle) gerade wahrgenommen ist. Für die Farbe wird die Frage insofern kompliziert, als die subjektive Helligkeit oder subjektive Intensität normalerweise mit der Wellenlänge variiert.
Wie soll man diese miteinander vergleichen, wenn sie von vornherein so unterschiedlich sind? Soll man ihre subjektive Helligkeit (die der Prüfmarke) ausgleichen und sich lediglich auf den Farbton stützen? Soll man jede Strahlung mit einem sogenannten Normalkoeffizienten versehen? Aber dieser ändert sich mit dem Lichtstärkenniveau und auch mit der Netzhautexzentrizität, was nicht untersucht werden soll.
In dieser schwierigen Lage sucht man sich einer objektiven physikalischen Definition zuzuwenden, die unabhängig von der Versuchsperson ist, und man nimmt die für jede Art der Strahlung durchgelassene Energie. Die Schwelle ist durch die kleinste, zur Wahrnehmung notwendige Energiemenge gekennzeichnet. Jetzt haben die Untersuchungen eine solide Basis."

Demnach ist als maßgebliche Einheit für die Intensität eines Reizes in der Farbenperimetrie die physikalische Energie-Einheit Watt/cm^2 aufzufassen, oder Einheiten anderer Maßsysteme, die sich ohne Schwierigkeiten in diese umrechnen lassen.

b) Definition der Farbe

"Was die spektrale Zusammensetzung der Prüfmarken angeht, so sollte sie so genau wie möglich gekennzeichnet sein, außer, wenn irgend ein triftiger Grund vorliegt. Das trifft die klinischen Methoden, die pigmentfarbene Prüfmarken benutzen, tödlich...."
"Die Verwendung von Spektralfarben oder von Filtern, die einen engen Durchlaßbereich haben, ist daher angebracht..."

c) Umfeld

D u b o i s - P o u l s e n bezieht sich mit seiner Forderung, daß Umfeldleuchtdichte und Reizleuchtdichte übereinstimmen sollen, auf die Arbeiten von F e r r e e und R a n d . Wie schon erwähnt, läßt sich diese Forderung jedoch für die Projektionsperimetrie nicht verwirklichen.

Dieser Grundforderung einer exakten physikalischen Definition im soeben angedeuteten Sinne wird nach D u b o i s - P o u l s e n (1952) allein die Arbeit von W e n t w o r t h (1930) gerecht, von späteren Publikationen zum Teil die Arbeit von M o n j é (1955).

II. Die Untersuchungsmethoden von Wentworth

Die Autorin beschränkt sich auf vier von einem Spektrometer erzeugte enge Spektralbänder mit den Wellenlängen 468.0, 522.0, 581.5 und 672.5 nm, deren Reinheit und Lage im Spektrum ständig kontrolliert wurden. Das aus einem Spektrometerspalt austretende Licht wurde auf eine runde Öffnung in der Mitte eines Kampimeter-Schirms geworfen, Für eine homogene Ausleuchtung dieser Öffnung wurde Sorge getragen. Eine Linse bildete diese Öffnung im konvergenten Strahlengang in der Pupillenebene des 25 cm vom Kampimeter-

schirm entfernten Auges ab. Auf diese Weise wurde die Pupillenweite eliminiert. Die Öffnung erschien unter einem Durchmesser von $1^{o}16'$, sie wurde für alle Versuche beibehalten. Für eine ausreichende Intensitätsabstufung sorgten Sektorenscheiben, Kodak-Gelatine-Filter und für Feinabstufungen ein Paar mit der Basis gegeneinandergesetzte Gelatine-Graukeile.

Die dabei von Gertrude R a n d ausgeführte Energiemessung wurde im wesentlichen mit einer Coblentz-Thermosäule und einem Thomson-Galvanometer vorgenommen. Fehlerquellen wurden dabei sorgfältig ausgeschaltet oder in den Berechnungen berücksichtigt. Die direkt an der Schirmöffnung gemessenen Energien wurden auf den Augenabstand von 25 cm umgerechnet.

Vor dem Kampimeterschirm war ein drehbarer Schwenkarm mit dem Fixierpunkt angebracht. Dieser trug außerdem vier phosphoreszierende Punkte, die gerade im blinden Fleck des fixierenden Auges verschwanden und durch Auftauchen am Rand des blinden Flecks dem Beobachter eine Bewegung des Auges anzeigten.

Der Kopf des Beobachters wurde durch Biß auf einen vom Gebiß des Beobachters angefertigten Abguß und durch eine Kinnstütze fixiert.

Die Untersuchungen wurden von der Autorin an ihrem linken, hinsichtlich seiner Sehschärfe, Farb- und Lichtempfindlichkeit völlig normalen Auge vorgenommen.

Die chromatischen Schwellen wurden für ein Umfeld von 7 Footcandles und für Dunkeladaptation bestimmt und außerdem die Gesichtsfeldgrenzen mit bewegter Prüfmarke ermittelt. Achromatische Schwellenbestimmungen wurden nur für das dunkeladaptierte Auge nach 45 min. Sichtabschluß vorgenommen.

Methodik, Apparatur und Strahlenmessung hat W e n t w o r t h von F e r r e e und R a n d übernommen. Wir werden in der Besprechung der Ergebnisse auf die Arbeit von W e n t w o r t h zurückkommen.

III. M o n j é untersuchte 1955 die absoluten Schwellen für einen Adaptationszustand auf ein 14 asb, 1.2 asb und 0 asb-Umfeld.
Die mit dem S c h o b e r - Projektor auf einen grauen Kampimeterschirm projizierten Prüfmarken waren 12' groß. Es wurden farbige Filtergläser von S c h o t t benutzt, deren Durchlaßmaxima bei 470, 500, 578 und 645 nm lagen. Die Farben sollen invariabel im Sinne von Engelking-Eckstein sein.
Die Schott-Filter-Typen sind nicht angegeben, so daß wir die Breite der Durchlaßbänder nicht beurteilen können.
S c h o b e r gibt die von diesen Farbfiltern durchgelassenen Intensitäten als Verhältnis der Leuchtdichten an, die sie auf einem Schirm erzeugen. Das Leuchtdichteverhältnis von Rot : Grün : Blau wird mit 1 : 1.1 : 1.1 angegeben; Monjé stellte später mit einem Bechstein-Flimmerphotometer ein Leuchtdichteverhältnis von 1 : 1.6 : 0.8 fest.
M o n j é bestimmte die achromatischen Schwellen auf verschiedenen Meridianen aus jeweils 20 für einen Netzhautort gefundenen Einzelwerten mit der Methode der statischen Perimetrie: er ließ die durch Neutralfilter abstufbare Leuchtdichte der Lichtreize am betreffenden Netzhautort anwachsen, bis die achromatische Schwelle erreicht war.

IV. Der klinische Wert der Farbperimetrie

wurde von einigen Autoren bestritten, von anderen hingegen unterstrichen. Die fehlende Standardisierung der Farbperimetrie, die angezweifelte Gültigkeit der Normalkurven und die Subjektivität der Methode sind die wesentlichen Gründe, welche zur Ablehnung der Farbperimetrie als einer klinisch verwertbaren Untersuchungsmethode geführt haben.
D u b o i s - P o u l s e n schreibt hierzu in seiner

Schlußbetrachtung zum Kapitel Farbperimetrie, daß bei den bisher unternommenen Untersuchungen ein "Dickicht" präziser Fakten entstanden sei, in das "keine gerade Schneise" geschlagen werden könne. Die einzig wahrheitsgemäße Haltung bestünde darin, gegenüber den klinischen Forderungen nach einfachen und gleichgerichteten Zusammenhängen den "völligen Konkurs" anzumelden. Doch zeigten die präzisen Arbeiten von W e n t w o r t h , daß dennoch kein Grund bestünde, aufzugeben; die Ergebnisse seien aber nur von einer Versuchsperson gewonnen.

In neuester Zeit, seitdem man über bessere Apparaturen, bessere Farbfilter (Interferenzfilter) und die Möglichkeit einer empfindlichen physikalischen Energiemessung verfügt, wurde von einzelnen Autoren die Farbperimetrie erneut in der klinischen Perimetrie verwendet. Vor allem Z a n e n hat einen neuen Anfang bezüglich der fovealen Farbempfindlichkeit gemacht.

C. Eigene Untersuchungen

I. Apparat

Es wurde ein nach dem Prinzip des "Tübinger Perimeters" (H a r m s) hergestelltes, jedoch größer dimensioniertes Halbkugelperimeter verwendet. Die Halbkugel, in deren Zentrum sich das zu untersuchende Auge befindet, hat einen Radius von 1 m. Die Innenfläche der Halbkugel ist mit einem neutral-weißen Belag versehen, auf welchen die Prüfmarken mit einem Projektor geworfen werden. Die Lage der Prüfmarke läßt sich durch einen in den Strahlengang des Projektors geschalteten drehbaren Oberflächenspiegel innerhalb eines Meridians verändern; durch Schwenken des ganzen Projektorarmes um die Blicklinie als Achse ist ein beliebiger Meridian einzustellen. Die Exzentrizität des Prüfpunktes und der eingestellte Meridian lassen sich auf einer Registriertafel genau ablesen.
Für eine gleichmäßige Ausleuchtung der Halbkugel sorgt ein Leitz-Projektor, dessen Lichtbündel über einen Spiegel auf eine periphere Stelle der Halbkugel außerhalb des Gesichtsfeldes fällt und nach dem Prinzip der Ulbrichtkugel die Innenfläche der Perimeterhalbkugel homogen ausleuchtet. Neutralfilter ermöglichen eine beliebige Abstufung der Umfeldleuchtdichte in einem Bereich von 1oo bis $1o^{-6}$ Apostilb.
Untersuchungen bei Dunkeladaptation wurden durch völlige Abschirmung der Halbkugel gegen störendes Licht mit Hilfe einer Zwischenwand ermöglicht, die in der Mitte eine Öffnung für den Kopf der Versuchsperson und einige weitere Öffnungen freiläßt, die zur Projektion von Prüfpunkt und Fixierpunkt notwendig sind.

Die Leuchtdichte des Fixierpunktes von 10' Durchmesser läßt sich beliebig durch die Verschiebung zweier mit der Basis gegeneinander gesetzter Graukeile, seine Farbe durch

Farbfilter verändern. Bei Prüfung des Gesichtsfeldzentrums wird der Fixierpunkt durch ein Fixierkreuz ersetzt, dessen Zentrum Gesichtswinkel von zwei Grad Durchmesser freiläßt.

Der Kopf der Versuchsperson wird durch eine verstellbare Kinn- und Stirnstütze weitgehend fixiert, eine Stütze für beide Arme und ein in seiner Höhe einstellbarer Sitz sorgen für eine bequeme Haltung des Untersuchten.

a) Prüfpunkt

Die Lichtquelle für die Prüfmarke ist eine "Punktlichtstrahlerlampe" (Osram) mit einer Spannung von 12 Volt und einer Leistung von 1oo Watt. Die Lampenspannung wird durch einen hochwertigen Netzstabilisator in Verbindung mit einem Transformator konstant gehalten. Blenden und zwei Graufiltersätze ermöglichen eine Änderung der Prüfpunktgröße von 5' bis 2^{o} und Intensitätsabstufungen im Bereich von 1ooo bis $1o^{-6}$ asb, wobei die Leuchtdichte des Prüfpunktes bei Einstellung der nächst höheren Stufe jedesmal um etwa 26% des vorhergehenden Leuchtdichtebetrages, also in logarithmischer Progression ansteigt. Eine Steigerung um 1o Stufen ergibt einen Leuchtdichteanstieg um das 1o-fache, d.h. um eine log. Dekade. Auf einer Kreisskala läßt sich die eingestellte Filterkombination und damit die Leuchtdichte der weißen Prüfmarke direkt ablesen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde ausschließlich eine Prüfmarke von 3o min. Durchmesser verwendet.

Die Schott-Neutralfilter vom Typ NG 3 stammen alle aus der gleichen Schmelze, um Unterschiede in der spektralen Durchlässigkeit zu vermeiden. Zur Kontrolle wurden die Stufenfilter mit einem Zeiss-Spektrophotometer (Typenbez. PQM II) mit einem Zusatzgerät (MM 12) hinsichtlich ihrer spaktralen Durchlässigkeit in kleinen Schritten über das ganze sichtbare Spektrum gemessen. Es ergab sich eine gute Parallelität der spektralen Durchlaßkurven über den Bereich 4oo - 8oo nm

Als Farbfilter fanden sieben Präzisions-Interferenzfilter (Schott, PIL) Verwendung. Die Wellenlängen der maximalen Durchlässigkeit waren (± o.5%):

1) 453.o nm = Dunkelblau
2) 479.o nm = Hellblau
3) 499.7 nm = Blaugrün
4) 523.3 nm = Grün
5) 577.5 nm = Gelb
6) 599.o nm = Orange
7) 658.o nm = Rot

Die Halbwertsbreiten (HW) dieser Filter bewegen sich zwischen 8 - 15 nm, die Zehntelwertsbreiten zwischen 25 und 4o nm. Diese Werte wurden mit dem oben erwähnten Spektralphotometer gemessen und es wurde Übereinstimmung mit den Schott-Katalog-Angaben innerhalb der angegebenen Fehlerbreite gefunden.
Mit einem elektromagnetischen Verschluß wurde der Strahlengang des Prüfpunktes bei allen Versuchen jeweils für etwa 1 Sek. freigegeben.

b) Umfeld

Die Prüfmarke wird auf das in seiner Leuchtdichte meßbar veränderliche Umfeld projiziert. Da der die Kugelinnenfläche bedeckende Belag die spektralen Eigenschaften des projizierten Prüfpunktes beeinflussen kann, ließen wir eine repräsentative Probe dieses Belages auf seine spektralen Remissionseigenschaften untersuchen. Die spektrale Remissionskurve zeigte gegenüber Bariumsulfat als Standard (R = 98%) eine Remission von 80% bei425 nm, die mit zunehmender Wellenlänge bis auf 93% bei 8oo nm sanft anstieg.

Prüfpunkt- und Umfeldleuchtdichten wurden mit einem Bechstein-Photometer, das in Apostilb geeicht war, ständig kon-

stant gehalten. Die Eichung von Prüfpunkt- und Umfeldleuchtdichten gehörte zum Programm einer jeden Versuchssitzung. Damit kann die Energie, die von den Farbfiltern durchgelassen wird, als konstant für jede Sitzung bezeichnet werden.

c) An die Versuchsserien schloß sich die Energiemessung des Prüfpunktes unter den Bedingungen an, wie sie bei unseren Versuchen eingehalten worden sind. In der Halbkugelwand ist seitlich ein Loch ausgespart, in welches ein Silicium-Photoelement mit einer Rezeptorfläche von 1 cm^2 geschoben wurde. Das Photoelement befand sich also an Stelle der reflektierenden Kugelinnenfläche.

In Vorversuchen wurde festgestellt, daß die Interferenzfilter im Infrarotbereich wesentliche Nebendurchlaßmaxima haben. Diese unsichtbare Strahlungsnergie, die in unsere Energiemessung eingehen würde, wurde mit einem 2 mm dicken KG 2- und einem KG 3-Wärmeschutzfilter abgeschirmt, deren spektrale Absorption und Reflektionsverlust bekannt waren. Ein Si-Photoelement hat gegenüber dem Selen-Photoelement den Vorteil, daß es in seiner spektralen Empfindlichkeit über eine längere Zeit konstant ist, und daß es weniger temperaturempfindlich ist als ein lineares Vacuum-Thermoelement.

Das Photoelement war zuvor von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt durch Vergleich mit einem Vacuum-Thermoelement absolut und relativ in seiner spektralen Empfindlichkeit unter den gleichen Meßbedingungen geeicht worden, wie sie dann bei uns vorlagen. Die Empfindlichkeit des Photoelementes wurde für die Wellenlängen gemessen, die wir für unsere Versuche benutzten und darüberhinaus noch für weitere sechs Punkte des sichtbaren Spektrums.

Einige Versuche erwiesen, daß das Photoelement linear arbeitete, d.h. daß der von vom Element gelieferte Strom- gemessen mit einem wiederholt geeichten, niederohmigen Galvanometer (Ruhstrat, KSG 6) - streng proportional der Energie war, mit der die Kugelinnenfläche pro cm^2 bei den verschiedenen Wellenlängen und Leuchtdichteeinstellungen des Prüfpunktes bestrahlt wurde.
Zur Gewinnung der absoluten, dem Auge an der Kugelwand in 100 cm Entfernung angebotenen Energiebeträge, mußten folgende Faktoren quantitativ berücksichtigt werden:

1) der Energieverlust an den Wärmeschutzfiltern durch Reflektion und Absorption,
2) die spektrale Empfindlichkeit des Si-Photoelementes,
3) die absolute Empfindlichkeit des Galvanometers und
4) Energieverluste infolge der spektralen Remissionseigenschaften der Perimeterinnenfläche.

Im folgenden sei ein Beispiel der Energieberechnung unter Berücksichtigung der eben angeführten Faktoren gegeben:
Für die Wellenlänge 577.5 nm wurde bei der Neutralfiltereinstellung "1oo asb" ein Galvanometerausschlag von 85.4 mm als Mittelwert aus mindestens fünf Einzelmessungen festgestellt. Da der Ausschlag der zu berechnenden Energie direkt proportional ist, können wir die einflußnehmenden Faktoren bereits an ihm quantitativ berücksichtigen.
Die relative spektrale Durchlässigkeit der Wärmeschutzfilter ist für 577.5 nm bei KG 2 = 0.95 und bei KG 3 = 0.85. Der Reflektionsverlust findet in dem Faktor 0.92 seinen Ausdruck. Multipliziert man diese drei Werte miteinander und bildet den Kehrwert, dann ist der Energieverlust an den Wärmeschutzfiltern mit dem Faktor $F_1 = 1.35$ berücksichtigt.
Die relative spektrale Empfindlichkeit des Si-Photoelements im Verhältnis zu der bei 710 nm festgelegten absoluten Empfindlichkeit ist für 577.5 nm = 0.511. Der Kehrwert F_2 berücksichtigt die für die vorliegende Wellenlänge geringere Empfindlichkeit mit $F_2 = 1.955$.

F_1 und F_2 mit dem "Rohausschlag" von 85.4 mm multipliziert ergibt den korrigierten Galvanometerausschlag von 225.5 mm.

Die Empfindlichkeit des Galvanometers ist:

$$S_g = 2.63 \times 10^{-9} \frac{A}{mm}.$$

Der korrigierte Galvanometerausschlag entspricht also einer Stromstärke von 5.93×10^{-7} Ampère. Bei einer absoluten Empfindlichkeit des Photoelements für 711 nm von

$$S_p = \frac{\text{Stromstärke}}{\text{Energie}} = 0.277 \frac{A}{Watt/cm^2}$$ ist dann

die Energie, mit der die Kugelinnenfläche bestrahlt wird:

$$E = \frac{5.93}{0.277} \times 10^{-7} \text{ Watt/cm}^2 = 2.14 \times 10^{-6} \text{ Watt/cm}^2$$

Der Kugelbelag hat bei 577.5 nm einen Reflektionsgrad von 93% bezw. 0.93. Nach dessen Berücksichtigung finden wir als Energie, die der Prüfpunkt an der Kugelwand abstrahlt 2.01×10^{-6} Watt/cm^2.

Mit unserer Strahlungsmeßapparatur konnten Energien bis zu 1×10^{-8} Watt/cm^2 sicher gemessen werden. Diese Meßempfindlichkeit ließ es zu, die Neutralfilterkombinationen innerhalb 2 - 3 logarithmischer Dekaden für die sieben Wellenlängen zu messen. Die Strahlungsnergien, die unter unserer Meßmöglichkeit lagen, wurden durch Extrapolation gewonnen. Die Tatsache, daß die erwartete Intensitätsabstufung, die uns aus der relativen spektralen Durchlässigkeit der verwendeten Neutralfilter bekannt war, gut mit der vom Si-Photoelement gemessenen Intensitätsabstufung übereinstimmte, berechtigte zur Extrapolation.

Ursprünglich sollte auch die Energie für die weiße Prüfmarke in ihren Abstufungen absolut gemessen werden, um die Lage der absoluten Empfindlichkeitsschwelle für Weiß-Licht

mit der für monochromatisches Licht vergleichen zu können. Bei den Energiemessungen ergab sich jedoch, daß der geforderte Reduktionsfaktor eines beispielsweise 1o% durchlässigen Neutralfilters - also eines Filters, das die Leuchtdichte für Weißlicht von 1oo auf 1o asb vermindert - nicht mit der Reduktion übereinstimmte, die wir für das 1o%-Filter mit dem Si-Photoelement gemessen haben. Hierbei ergab sich nämlich meist nur eine Abschwächung der Energie auf etwa 5o%. Das läßt vermuten, daß trotz der Verwendung von Wärmeschutzfiltern in unserem "Weiß"-Licht noch ein großer Betrag von unsichtbarer Strahlung steckt, die von den Graufiltern vor allem im Infrarotbereich unkontrollierbar durchgelassen wird. Diese Unmöglichkeit, den sichtbaren Anteil des weißen Prüfpunktes absolut energetisch zu messen, wie wir es für das monochromatische Licht der Interferenzfilter durchführen konnten, zwang uns, von der an sich sehr interessanten Einbeziehung der Prüfmarke "Weiss" in unser Versuchsprogramm abzusehen.

Die auf den Ordinaten unserer Kurven angegebenen Energien beziehen sich auf die Energie/cm^2, die in 1oo cm Entfernung dem rechten Auge der Versuchsperson angeboten wurde. In Höhe der Cornea des Untersuchten ist nach dem Gesetz, daß sich die Strahlungsenergie mit dem Quadrat der Entfernung abschwächt, nur noch der 1o ooo-ste Teil dieser Energie nachzuweisen. Die auf der Ordinate angegebenen Energiebeträge sind dann mit dem Faktor $1o^{-4}$ zu multiplizieren.

II. Untersuchungsmethode

Die Versuche wurden an drei emmetropen und am Nagel-Anomaloskop als farbtüchtig befundenen, weiblichen Versuchspersonen im Alter von 25, 30 und 35 Jahren vorgenommen. Sieben monochromatische Lichter wurden bei drei verschie-

denen Umfeldern geprüft, und zwar bei 1o asb, o.1 asb und bei Dunkeladaptation auf ein 0 asb-Umfeld, so daß von jeder Versuchsperson 21 Schwellenkurven bestimmt wurden. Bei allen drei Versuchspersonen wurde das rechte Auge untersucht. Das andere wurde während der Untersuchung mit einer mattglasartigen Augenklappe aus Kunststoff bedeckt, um einen annähernd gleichen Adaptationszustand wie auf dem untersuchten Auge zu erhalten.
Der Verlauf jeder Versuchssitzung ist durch folgende Punkte gekennzeichnet:

a) Eichung des Umfeldes und des Prüfreizes in asb,
b) Adaptation der Versuchsperson,
c) Perimetrieren des blinden Flecks,
d) Prüfung des Gesichtsfeldzentrums,
e) Prüfung der Gesichtsfeldperipherie.

ad a: Prüfpunkt- und Umfeldleuchtdichten wurden vor jeder Sitzung sorgfältig kontrolliert und geeicht. Hierzu diente ein in asb geeichtes Bechstein-Photometer (Fa. Schmidt & Haensch). Ein eventueller Leuchtdichteschwund wurde mit Hilfe eines die Stromstärke an der Prüfpunktbirne in feinsten Stufen regelnden Widerstandes ausgeglichen. Das gleiche geschah mit der Umfeldbeleuchtung. Es wurden nur geringfügige Schwankungen festgestellt.

ad b: Die Adaptationszeiten für die Versuchspersonen waren je nach Umfeld: für das 1o asb-Umfeld = 15 min.
für das o.1 " " = 3o min.
für das 0 " " = 45 min.
Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, daß bei Einhalten dieser Adaptationszeiten die für jedes Umfeld höchstmögliche Netzhautempfindlichkeit erreicht ist.

ad c: Das genaue Perimetrieren des blinden Flecks geschah mit einer weißen Prüfmarke von 1o' Durchmesser und einer Intensität, die etwa zwei Dekaden höher lag als die Weiß-Schwelle für den betreffenden Adaptationszustand im Zentrum. Besondere Sorgfalt ließen wir bei der Dunkeladaptation walten, um diese nicht zu beeinflussen. Deshalb wurde bei Dunkeladaptation nur eine Prüfpunktleuchtdichte von o.1 asb verwendet. Die Versuchsperson gab bei langsam bewegter Marke an, wann der Prüfpunkt verschwand und wann er wieder gesehen wurde.
Die Bestimmung des blinden Flecks geschah aus folgendem Grund:
Die Fixierung des Blickes auf den Fixationspunkt verhindert zwar seitliche Verschiebungen des Auges, nicht aber eine Verrollung um die Fixierlinie als Achse. Daß geringfügige Verrollungen tatsächlich vorkommen, kann man durch Perimetrie des blinden Fleckes feststellen. Solche Verrollungen bewirken, daß bei mehrfacher Empfindlichkeitsmessung entlang eines Meridians im Perimeter nicht immer genau derselbe Netzhautmeridian getroffen wird. Dies kann man nur erreichen, wenn man die Messungen stets in gleicher räumlicher Beziehung zum blinden Fleck durchführt, indem man z.B. stets den Gesichtsfeldmeridian wählt, der durch die Mitte des blinden Fleckes verläuft. Da bei unseren 3 Vpn. jedoch keine merkliche Verrollung des Augapfels vorhanden war, brauchten die Meridiane bei einer Vp. nicht gewechselt zu werden; dagegen lag der durch die Mitte des blinden Flecks gehende Meridian bei den 3 Vpn. verschieden (180°, 175° und 170° Meridian).

ad d: Bei der eigentlichen Untersuchung wurde stets zuerst das Gesichtsfeldzentrum mit statischer Perimetrie geprüft. Ein Fixierkreuz mit ausgespartem Zentrum, in dem der Prüfpunkt erscheint, diente zur Fixation. Alle Versuche wurden mit einer 3o' großen Prüfmarke vorgenommen. Man nähert

sich dabei der Schwelle durch stufenweise Steigerung der Reizintensität. Das erste Wahrnehmen eines Lichtschimmers wird von der Versuchsperson durch Druck auf einen Knopf angezeigt, der einen Summerton auslöst. Die Darbietungszeit betrug stets etwa eine Sekunde mit einer mindestens zwei Sekunden währenden Zwischenpause bis zur Darbietung der nächst höheren Intensitätsstufe. Damit wurde verhindert, daß eine evtl. vorhandene Lokaladaptation an den Prüfreiz die Empfindlichkeitsmessung beeinflußte. Nach jeder Bestimmung wurde der Schwellenwert in ein vorbereitetes Diagramm eingetragen, bei dem der Logarithmus der Schwellenintensität die Ordinate und die Exzentrizität des Prüfpunktes in Grad die Abszisse bilden. Wie üblich wurden die Schwellenintensitäten auf der Ordinate nach unten zunehmend aufgetragen, so daß man nach der Beziehung:

$$\text{Empfindlichkeit} = \frac{1}{\text{Intensität}}$$

die Empfindlichkeit direkt aus der Kurvenhöhe entnehmen kann. Die Schwellen im Zentrum wurden mehrfach, mindestens dreimal bestimmt.

ad e: Zur Prüfung in der Peripherie wurde zunächst die Fixationsfigur mit einem 1o' großen Fixierpunkt vertauscht und die Empfindlichkeit erst auf der temporalen Seite, dann auf der nasalen an folgenden Punkten bestimmt:

temp.:	o.5	1	2	3	4	6	8	1o	12	13	18	19	2o	22	25	30°
nas.:	o.5	1	2	3	4	6	8	1o		15			2o		25	30°

temp.:	4o	5o	6o	7o	8o	9o°
nas.:	4o	5o	55°			

Wurde die hellste Prüfmarke bei 90^{o} nicht mehr gesehen, dann wurde der Netzhautort gesucht, an dem sie noch gerade gesehen wurde. Auf der nasalen Seite kamen wir zwischen 55 und 58^{o} meist an die durch die Nase bedingte Grenze, an welcher dann auch die hellste Marke nicht mehr gesehen wurde.

Bei ein und derselben Versuchsperson ergab sich bei mehrmaliger Bestimmung der Schwelle im Durchschnitt eine Streuung von $\pm$ 1 - 2 Stufen. Die Versuchssitzungen fanden zu unterschiedlichen Tageszeiten statt und wurden nie länger als 1 1/2 Stunden ausgedehnt, wobei die Bestimmung des blinden Flecks als Versuchsbeginn betrachtet wurde.

Zusammenfassend sind unsere Versuche durch folgende Bedingungen gekennzeichnet:

1) Prüfpunktgröße 3o Winkelminuten,
2) Darbietungszeit 1 Sekunde,
3) Prüfung im horizontalen Meridian des rechten Auges, nasal und temporal, in kleinen Schritten in foveanahen Arealen, in größeren in der Peripherie, bei drei Versuchspersonen.
4) Als Farbfilter wurden Schott-Interferenzfilter (PIL) für folgende Wellenlängen verwendet:

453.o nm (1)	577.5 nm (5)
479.o nm (2)	599.o nm (6)
499.7 nm (3)	658.o nm (7)
523.3 nm (4)	

5) Logarithmische Intensitätsabstufung mit NG 3-Neutralfiltern verschiedener Dicke.
6) Monochromatische Lichtreize bekannter Energie.
7) Fixierpunkt und Fixierkreuz farblos.
8) Drei Umfelder: 1o asb, o.1 asb und 0 asb.
9) Methode der statischen Perimetrie nach H a r m s mit Schwellenbestimmung in aszendierender Weise.

III. Ergebnisse

a) Allgemeines (Abb. 1 – 4)

Die ersten vier Abbildungen zeigen Beispiele von den 63 Kurven, wie sie bei den Versuchen gewonnen wurden. Die Schwellenwerte der monochromatischen Reizlichter sind hier so eingetragen, als ob es sich um die Leuchtdichte eines weißen Prüfpunktes handelte. Die Form der Kurven läßt das Empfindlichkeitsverhältnis der geprüften Netzhautpunkte zueinander bereits erkennen, da die Graufilter die Leuchtdichte und die Energie in gleichem Maße abstufen. Das Verhältnis von Ordinate und Abszisse ist für alle Kurven so gewählt, daß einer Intensitätsabstufung von einer logarithmischen Dekade eine Exzentrizität von 1o° auf der Abszisse entspricht.

Um einen Anhalt für die Streuung zu gewinnen, haben wir die Ergebnisse der drei Versuchspersonen in ein Diagramm gezeichnet. Die Kurven stellen die Ergebnisse für zwei Wellenlängen, 479.o und 523.3 nm, für das Umfeld von 1o und O asb dar.

Eine Streuungsberechnung konnte wegen der geringen Zahl der Versuchspersonen nicht angestellt werden, doch bewegt sich die Variationsbreite in Grenzen, die der von M e y e r - G e h l e n festgestellten Sigmastreuung von ± 2 Stufen entsprechen.

Hinsichtlich der Variationsbreite ließ sich im wesentlichen folgendes feststellen:

1. Die Variationsbreite ist bei dem hellen Umfeld am kleinsten, beim dunklen Umfeld am größten.
2. Je größer die Exzentrizität, desto mehr divergiert die Kurvenschar.
3. Ein unterschiedlicher Einfluß der Wellenlängen auf die Variationsbreite wurde nur insofern gefunden, als bei

Dunkeladaptation die Kurven der kurzen Wellenlängen (Trichterbildung) im Gesichtsfeldzentrum weiter auseinander liegen.

4. Bei allen monochromatischen Reizlichtern war die Kurvenform der drei Versuchspersonen etwa gleich.

Bei den folgenden Kurven ist als Ergebnis unserer Energiemessungen stets der Energie-Mittelwert der drei Versuchspersonen in Watt/cm^2 auf der Ordinate in logarithmischem Maßstab nach unten zunehmend aufgetragen.

Wir haben die Resultate nach dem Einfluß der beiden Veränderlichen, nämlich der Wellenlänge und des Adaptationszustandes aufgeteilt. Bei der Beschreibung der einzelnen Kurven haben wir versucht, diese nach Teilstücken typischen Verhaltens aufzugliedern. Von Zahlenangaben haben wir möglichst abgesehen, da die quantitativen Einzelheiten mit hinreichender Genauigkeit aus den Abbildungen zu entnehmen sind.

Zunächst sei der Einfluß der Wellenlänge der Prüfmarke auf die Empfindlichkeit der Netzhaut bei den Umfeldern

b) 1o asb (Helles Umfeld = Photopisches Sehen)
c) o.1 " (Mittleres Umfeld = Mesopisches Sehen)
d) 0 " (Dunkles Umfeld = Skotopisches Sehen)

dargestellt.

b) Helles Umfeld, 1o asb (Abb.5)

Hinsichtlich des Kurvenverlaufes läßt sich im allgemeinen folgendes feststellen: Wir finden auf der temporalen Seite bis 1o° einen stärkeren Empfindlichkeitsabfall als auf der nasalen. Jenseits davon fällt die Empfindlichkeit nasal etwas rascher ab als temporal. Das gilt in der Regel auch für die beiden anderen Umfelder.

1) Zentrum 0^{o}

Für 523.3 nm zeigt das Gesichtsfeldzentrum die höchste, für 658.o nm die geringste Empfindlichkeit. Nach der Empfindlichkeit ergibt sich die Reihenfolge:

523.3 - 577.5/599.o - 499.7 - 453.o - 658.o nm

Die Schwellenenergien verhalten sich dabei wie:
(Energie für 523.3 = 1)

1 : 2 : 3.3 : 5.3 : 7

2) o.5 - 15^{o}

Im parafovealen Netzhautbereich von o.5 bis 2^{o} zeigen die Kurven ein unterschiedliches Empfindlichkeitsverhalten. Wir finden für die kurzen Wellenlängen 453.o und 479.o nm ein relatives Skotom, für 499.7 nm eine zentrale Plateaubildung. Für die übrigen Wellenlängen findet sich eine zentrale Spitze um so stärker ausgeprägt, je länger die Wellenlänge ist. Dieses Verhalten führt zu mehrfachen Überschneidungen zwischen 2 und 15^{o}, einem Bereich, innerhalb dessen die Kurven mehr zusammenrücken und flacher abfallen.
Der Verlauf der Kurven zwischen 0 und 10^{o} ist in Abb. 8 für das 10 asb-, 0.1 asb- und 0 asb-Umfeld auf ein Kurvenblatt gezeichnet und aus Gründen der Übersichtlichkeit nebeneinander dargestellt. Die von den drei übereinanderliegenden Kurvenstücken jeweils am tiefsten liegenden beziehen sich auf das 10 asb-Umfeld, die mittleren auf das 0.1 asb-Umfeld und die im Diagramm am höchsten liegenden auf das 0 asb-Umfeld.

3) 15^{o} (20^{o}) - 50^{o}

Das Kurvengefälle in diesem Gesichtsfeldbereich ist für alle Wellenlängen etwa gleich und nasal etwas stärker als temporal. Nasal und temporal ist die Empfindlichkeit

für die Wellenlängen 523.3, 453.o und 658.o nm deutlich verschieden und entspricht bei 3o° einem Schwellenenergieverhältnis von (523.3 = 1)

1 : 3 : 14.

Die Empfindlichkeitskurven für die übrigen Wellenlängen liegen ziemlich eng beieinander zwischen denen für 523.3 und 453.o nm

4) In der äußersten Peripherie ließen sich nasal jenseits von 55° keine verwertbaren Ergebnisse mehr gewinnen. Temporal finden wir zwischen 5o und 8o° einen stärkeren, für die Wellenlängen verschiedenen Empfindlichkeitsabfall. Die Netzhaut bleibt für die Wellenlängen 453.o, 577.5 und 523.3 nm weiter in die Peripherie empfindlich. Die bei 8o° temporal festgestellte Netzhautempfindlichkeit läßt vermuten, daß die temporalen Gesichtsfeldgrenzen für 523.3 nm weiter außen liegen als für die übrigen Wellenlängen.

c) Mittleres Umfeld, o.1 asb (Abb.6)

1) Zentrum 0°

Im Zentrum besteht jetzt eine gleichmäßig hohe Empfindlichkeit für Wellenlängen von 523.3, 577.5 und 599.o nm. Der Empfindlichkeitsreihenfolge:

523.3/577.5/599.o - 499.7 - 479.o - 658.o - 453.o nm

entspricht ein Schwellenenergieverhältnis von:

1 : 2.2 : 5 : 7.8 : 1o.6

Gegenüber dem 1o asb-Umfeld variiert die Empfindlichkeit für die verschiedenen Wellenlängen über einen größeren Bereich und für die Wellenlänge 453.o nm liegt hier bei einer tiefen "Trichterbildung" die Empfindlichkeit am niedrigsten.

2) 0.5° - $1o^{\circ}$

Deutlicher als beim 1o asb-Umfeld variiert in diesem Bereich das Empfindlichkeitsverhalten gegenüber den verschiedenen Wellenlängen.
Die Abb. 8 veranschaulicht in den sich auf das o.1 asb-Umfeld beziehenden Kurvenstücken folgende Feststellungen: Wir finden eine zentrale Trichterbildung für die Wellenlängen 453.o, 479.o, 499.7 und 523.3, dagegen eine Gipfelbildung für 577.5, 599.o und 658.o nm. Mit zunehmender Wellenlänge flacht sich der Trichter ab und schlägt zwischen 523.3 und 577.5 nm in eine zentrale Spitze um, die sich bis 658 nm stärker ausprägt. Der Umschlagspunkt hat sich gegenüber dem hellen Umfeld zu den langen Wellenlängen hin verschoben.

3) Zwischen 1o und 20° nasal und 1o und 40° temporal verlaufen die trichterbildenden Kurven ohne nennenswerten Abfall. Temporal gilt das ebenfalls für die gipfelbildenden Kurven, wobei die Plateaubildung für 658.o nm auffällt. Dem steht nasal ein leichter, doch deutlicher Empfindlichkeitsabfall für die spitzenbildenden Wellenlängen gegenüber, der zwischen 2o und $4o^{\circ}$, wo auch die kurzen Wellenlängen etwas an Höhe verlieren, stärker zunimmt. Für 577.5 und 453.o nm zeigt die Netzhautperipherie über größere Gesichtsfeldbereiche eine gleiche Empfindlichkeit.

Bei 30° hat sich gegenüber dem Zentrum die spektrale Netzhautempfindlichkeit infolge der Empfindlichkeitsabnahme für die langen Wellenlängen und der Empfindlichkeitszunahme für die kürzeren Wellenlängen verändert. Wir finden bei $3o^{\circ}$ nasal die Empfindlichkeitsreihenfolge:

523.3 - 499.7/479.o - 453.o/577.5 - 599.o - 658.o nm

mit einem Schwellenenergieverhältnis von (523.3 = 1)

1	: 1.5	: 3.6	: 7	: 95	(nasal)	
und temporal:						
1	: 1.6	: 5.o	: 7.5	: 76.5		

d) Dunkles Umfeld, 0 asb (Abb. 7)

Zwei Besonderheiten sind bezüglich der Empfindlichkeitsverteilung im 0^{o}-Meridian zu erwähnen:

Für 523.3 nm ist die Netzhaut zwischen 8 und $1o^{o}$ temporal empfindlicher als nasal. Hier wurde die absolut kleinste Energiemenge wahrgenommen. Der Prüfpunkt hatte eine Schwellenenergie von $1.62 \times 1o^{-11}$ Watt/cm^2.

Berücksichtigt man, daß der Prüfpunkt 1oo cm weit vom Auge entfernt ist, so beträgt das Minimum der auf die Netzhaut gelangenden Energie, die noch wahrgenommen wurde, im Mittel

$$1.62 \times 1o^{-15} \text{ Watt/cm}^2.$$

Eine unserer Versuchspersonen hatte bei 8^{o} temporal sogar schon eine Lichtempfindung bei $7.16 \times 1o^{-16}$ Watt/cm^2.

Die Kurve für 453.o nm liegt nasal höher als temporal. Temporal verläuft sie mit der für 577.5 nm zwischen 3 und 13^{o} gemeinsam.

1) Zentrum, 0^{o}

Für alle Wellenlängen, mit Ausnahme von 658.o nm ist eine Trichterbildung vorhanden. Die Empfindlichkeitsreihenfolge bei 0^{o} und das Schwellenenergieverhältnis (523.3 = 1) sind:

523.3 - 577.5 - 499.7 - 599.o - 479.o - 453.o - 658.o nm

1 : 2.2 : 2.9 : 4.2 : 7.2 : 31.1 : 37.5

2) Parazentraler Bereich

Die Abb. 8 bezieht sich in den jeweils am höchsten liegenden Kurvenstücken auf das 0 asb-Umfeld und macht folgende Ergebnisse im zentralen Bereich deutlich:

-Bis auf 658.o nm findet sich für die Kurven aller Wellenlängen eine Trichterbildung.
-Mit zunehmender Wellenlänge werden die Trichter flacher.
-Der Umschlag zwischen Trichter- und Gipfelbildung liegt zwischen 599.o und 658.o nm.
-Der Rand des Trichters und das Kurvenmaximum sind bei 8^{o} erreicht.

3) 8^{o} - $5o^{o}$ nasal

In diesem Bereich finden wir einen allmählichen Kurvenabfall bei allen Wellenlängen, wobei sich 453.o und 479.o mehrfach überschneiden. Die unterschiedliche Empfindlichkeit der Netzhaut gegenüber den Wellenlängen bei 40^{o} zeigt sich in dem weiten Auseinanderliegen der Kurven und drückt sich bei einer Reihenfolge von:

523.3 - 499.7/479.o - 453.o - 577.5 - 599.o - 658.o nm

in einem Schwellenenergieverhältnis von:

1 : 1.5 : 4.9 : 11.2 : 46.1 : 217o aus.

4) $1o^{o}$ - $9o^{o}$ temporal

Jenseits des blinden Flecks zeigt sich bei 22^{o} deutlich eine Empfindlichkeitssteigerung für 453.o, 479.o, 577.5 und 599.o nm. Von 25 - $7o^{o}$ verlaufen die Kurven flach, die Empfindlichkeit ändert sich nur wenig.
Bei 30^{o} finden wir die Empfindlichkeitsreihenfolge:

523.3 - 499.7/479.o - 453.o - 577.5 - 599.o - 658.o nm

mit einem Schwellenenergieverhältnis von:

1 : 2.2 : 5.7 : 9.1 : 61.o : 23oo

Von 7o bis $9o^{o}$ fällt die Empfindlichkeit für alle Wellenlängen wieder stärker ab.

e) Zusammenfassung

Für die drei verschiedenen Umfelder, bei denen geprüft wurde, läßt sich in Bezug auf die Höhenlage und Form der achromatischen Empfindlichkeitskurven folgendes feststellen (s. besonders Abb. 8):

1) Die Empfindlichkeit der Netzhaut ist für 523.3 nm bei allen drei Umfeldern an fast allen Gesichtsfeldorten am größten, für 658.o nm am kleinsten.
2) Die Empfindlichkeitskurven haben bei Adaptation an das O-asb-Umfeld ihr Maximum zwischen 8 und 15°, bis auf die Kurve für 658.o nm, die eine geringe zentrale Spitze zeigt.
3) Je dunkler das Umfeld, desto unterschiedlicher die achromatische Empfindlichkeit gegenüber den einzelnen Wellenlängen.
4) Je dunkler das Umfeld, desto ausgeprägter zeigt sich eine zentrale Trichterbildung, die für 453.o und 479.o nm bereits bei hellem Umfeld als relatives Skotom nachzuweisen ist.
   Mit sinkender Umfeldleuchtdichte verschiebt sich der Umschlag von Trichter- zu Gipfelbildung im Zentrum zum langwelligen Ende des Spektrums hin, so daß bei Adaptation an das dunkle Umfeld nur noch für die Wellenlänge 658.o nm eine geringe zentrale Empfindlichkeitsspitze vorliegt.

D. Besprechnung der Ergebnisse

I. Bewertung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse

Bei der Auswertung der Einzelkurven ist zu beachten, daß es sich nicht um statistisch gesicherte Befunde handelt. Eine genügend häufige Messung an einem Netzhautort hätte zu einer nicht tragbaren Verlängerung der Versuche geführt. Aus dem glatten Verlauf der Einzelkurven (vgl. Abb. 1 - 4) ist jedoch zu entnehmen, daß die Streuungsbreite einer Versuchsperson vermutlich nicht größer ist als bei der Schwellenwertbestimmung mit weißer Prüfmarke, die uns aus früheren Versuchen mit $\pm$ 0.2 logar. Dekaden bekannt ist (Meyer-Gehlen).

Die Durchführung der Versuche an drei Versuchspersonen ergibt einen Hinweis auf die Unterschiede in der Empfindlichkeit bei den verschiedenen Individuen, erlaubt jedoch keine Berechnung der Streuung für ein Kollektiv. Es erschien uns aber auf Grund der Kurvenlage der drei Versuchspersonen und der Erfahrung bei Untersuchung mit weißem Prüfpunkt statthaft, die Ergebnisse in einer arithmetischen Mittelwertkurve darzustellen.

Die Reihenfolge der Empfindlichkeit für verschiedene Wellenlängen ist aus den Mittelwertkurven dann zuverlässig zu entnehmen, wenn sie einen großen Abstand voneinander haben, also vor allem bei Dunkeladaptation. Bei Helladaptation, wenn die Mittelwertkurven enger beieinander liegen, kann die Reihenfolge der Empfindlichkeit für die Wellenlängen innerhalb eines Meridians wechseln, weil die Einzelkurven der verschiedenen Versuchspersonen für verschiedene Wellenlängen sich häufiger überschneiden. Bei diesem geringen Abstand der Kurven ist die Feststellung einer Reihenfolge allerdings auch ohne Bedeutung. Die prinzipielle Verteilung

der Empfindlichkeit gegenüber den verschiedenen Wellenlängen wird hingegen aus den Mittelwertkurven deutlich.

II. Einfluß der Adaptation

Von besonderem Interesse erscheint es, den Einfluß der Adaptation auf Höhenlage und Form der Kurven genauer zu betrachten. Dazu ist es zweckmäßig, die Ergebnisse in anderer Form darzustellen. Wir haben in der Abbildung 9a - e auf der Ordinate die Schwellenergien logarithmisch und nach unten zunehmend aufgetragen, die für die sieben auf der Abszisse befindlichen Wellenlängen an ein und demselben Netzhautort ermittelt wurden.

Die sieben Energiewerte für das gleiche Umfeld sind nach Art einer spektralen Empfindlichkeitskurve durch Kurvenzug verbunden und der Empfindlichkeitszuwachs für das o.1 asb- gegenüber dem 1o-asb-Umfeld und der für das 0 asb- gegenüber dem o.1 asb-Umfeld durch Schraffur bezw. Schwärzung hervorgehoben. Die fünf Diagramme gelten für die Netzhautorte 0^{o} sowie 2^{o}, 4^{o}, $1o^{o}$ und $3o^{o}$ temporal. Einzelheiten sind aus der Betrachtung der Kurven und aus den beiden Tabellen zu entnehmen.

Tabelle 1

0^{o}(NH-Zentrum)

	453.o	479.o	499.7	523.3	577.5	599.o	658.o	nm
$F_{1o-o.1}$	3.9	6.3	9.1	5.9	1o.5	8.2	6.9	
$F_{o.1-o}$	2.8	5.8	6.1	8.3	4.3	3.5	1.8	
F_{1o-o}	1o.9	36.4	55.5	49.o	45.o	28.6	12.4	

Tabelle 2

10^{o}(temporal)

	453.o	479.o	499.7	523.3	577.5	599.o	658.o	nm
F_{1o-0}	258o	67oo	621o	735o	13oo	42o	57.o	

In diesen beiden Tabellen ist für die Netzhautorte der Empfindlichkeitszuwachs bei den sieben verschiedenen Wellenlängen im Verlauf der drei Adaptationsstufen als Faktor ausgedrückt. Es bedeuten:

$F_{1o-o.1}$ Empfindlichkeitsanstieg im mesopischen o.1 asb-Umfeld bezogen auf die Empfindlichkeit beim 1o asb-Umfeld.

$F_{o.1-0}$ Empfindlichkeitsanstieg für das skotopische 0 asb-Umfeld bezogen auf die Empfindlichkeit beim o.1 asb-Umfeld.

F_{1o-0} Totaler Empfindlichkeitsanstieg für das skotopische 0 asb-Umfeld bezogen auf die Empfindlichkeit beim photopischen 1o asb-Umfeld.

Der Einfluß des Adaptationszustandes auf die Empfindlichkeitskurven läßt sich also folgendermaßen zusammenfassen (Abb. 9, a - e):

1. Bei allen drei Adaptationszuständen wurde an allen geprüften Netzhautorten die höchste Empfindlichkeit für 523.3 nm gefunden.
2. Im Netzhautzentrum ist bei Helladaptation die Empfindlichkeit für den langwelligen Anteil des Spektrums etwas höher als für den kurzwelligen. Der Zuwachs an Empfindlichkeit bei Dunkeladaptation erfolgt für den lang- und für den kurzwelligen Anteil etwa symmetrisch. Er ist bei 523.3 nm am stärksten und wird nach den Enden des Spektrums hin geringer.
3. In der Netzhautperipherie ist bei Helladaptation die Empfindlichkeit für kurzwelliges Licht deutlich höher als für langwelliges. Der Empfindlichkeitszuwachs ist für

alle Wellenlängen größer als im Netzhautzentrum, außerdem aber für den kurzwelligen Bereich erheblich stärker als für den langwelligen.

Daraus ergibt sich, daß die Kurven der spektralen Empfindlichkeit für das Netzhautzentrum bei allen drei Adaptationszuständen einen etwa symmetrischen Abfall nach den Enden des sichtbaren Spektralbereiches zeigen, während in den Kurven für die Netzhautperipherie das kurzwellige Ende durch die Dunkeladaptation stark angehoben wird.

Es liegt nahe, anhand unserer Ergebnisse die Verschiebung des Helligkeitsmaximum der spektralen Empfindlichkeitskurve bei Hell- und Dunkeladaptation (Purkinje-Phänomen) zu überprüfen. Das ist jedoch nicht möglich, weil in der Reihe unserer Spektralfilter Lücken bestehen.

Die Empfindlichkeitskurven unserer Versuchspersonen sind in Wirklichkeit noch für drei weitere Schott-Interferenzfilter, nämlich für 710.5, 550 und 399 nm ermittelt worden. Aus äußeren Gründen konnte die Messung der durchgelassenen Energie erst nach Abschluß der Untersuchungen vorgenommen werden. Dabei zeigte sich leider, daß für die genannten drei Filter mit unserer Meßmethode die Energie des durchgelassenen sichtbaren Spektrallichtes nicht ermittelt werden konnte, weil offenbar störende Nebenmaxima im Infrarotbereich vorhanden waren. Deshalb mußten wir darauf verzichten, die mit den genannten Filtern festgestellten Empfindlichkeitswerte in unsere Ergebnisse aufzunehmen.
Das ist für das Filter 550 nm besonders bedauerlich, weil hier das Maximum der V_λ -Kurve für Tagessehen liegen soll und damit die Frage der Verschiebung des Empfindlichkeitsmaximum unter Adaptationsänderung nicht diskutiert werden kann.

Es bestehen allerdings noch andere Gründe, die einen Vergleich mit den bekannten Kurven der spektralen Hellempfindlichkeitsverteilung (so z.B. der international vereinbarten C.I.E.-Kurven) nicht ohne weiteres erlauben:

1. Bei den V_λ -Messungen handelt es sich meist um Vergleichsmessungen mit überschwelligen Reizen, nicht um echte Schwellenbestimmungen, wie sie unseren Ergebnissen zugrunde liegen.
2. Die V_λ -Werte sind ohne strengen Bezug auf den Netzhautort gewonnen (Peripheriewerte und Ergebnisse im Netzhautzentrum sind miteinander gemittelt), so daß die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit der verschiedenen Netzhautbereiche nicht berücksichtigt ist.
3. Die V_λ -Werte sind durch Mittelung von Ergebnissen mit sehr verschiedenen Prüffeldgrößen gewonnen worden (z.B. Minimalfeldwerte, Flimmerwerte).
4. Bei unseren Messungen wurden die verschiedenen Spektrallichter auf eine weiße Fläche projiziert, die das Umfeld darstellte. War der Reiz unterschwellig, so erschien das Umfeld auch an der Prüfstelle homogen. Den V_λ -Bestimmungen hingegen liegen zum großen Teil Messungen mit direkt auf das Auge gerichtetem Spektrallicht zugrunde. Ein Vergleich mit den Ergebnissen unserer Untersuchungen ist somit nur bei völlig dunklem Umfeld möglich.

Die physikalischen Reizbedingungen sind also sehr verschiedener Natur. Wenn uns aus allen diesen Gründem die jetzt vorliegenden Ergebnisse zur Überprüfung des Purkinje-Phänomens nicht geeignet erscheinen, so wird es doch von Interesse sein, durch weitere experimentelle Untersuchungen zu überprüfen, ob und wie sich dieses Phänomen bei der Bestimmung von achromatischen Schwellen mit unserer Methode nachweisen läßt.

III. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren

Unter dem Gesichtspunkt der Perimetrie sind, wie eingangs erwähnt, Untersuchungen mit physikalisch exakter Methodik nur von W e n t w o r t h ausgeführt worden. Auf die Untersuchungen von M o n j e soll hier nicht näher eingegangen werden, weil die physikalischen Bedingungen bei seinen Versuchen zu wenig definiert sind, um eine Aussage über die Energie der verwendeten Lichtreize zu erlauben.

Es soll erörtert werden, wieweit die Ergebnisse W e n t w o r t h 's mit den unsrigen vergleichbar sind.

W e n t w o r t h hat - wie wir - Kurven der Schwellenenergie für verschiedene Spektrallichter an verschiedenen Netzhautorten bestimmt. Sie hat jedoch an der geprüften Netzhautstelle nur das spektrale Licht als Prüfreiz dargeboten und es nicht einer bestimmten Umfeldleuchtdichte hinzugefügt, wie es bei unserer Versuchsanordnung der Fall war. Deshalb können von unseren Ergebnissen nur die bei völlig dunklem Umfeld gewonnenen mit inren Kurven verglichen werden.

In Abb. 1o sind die achromatischen Schwellen nach Wentworth in der gleichen Weise dargestellt wie unsere Ergebnisse in Abb. 7. Dabei finden sich erhebliche Unterschiede, die sowohl die Höhenlage wie die Form der Kurven betreffen und deren vermutliche Ursachen jetzt besprochen werden sollen.

1. Nur einige der von Wentworth verwandten monochromatischen Prüfreize haben die gleiche Wellenlänge wie unsere Prüfreize. Wir beschränken deshalb den Vergleich zunächst auf die Kurven der Wellenlängen 522 (Wentworth) und 523.3 nm sowie auf 581.5 (Wentworth) und 577.5 nm. Diese Kurven sind in der Abb. 11 zusammen dargestellt.

2. In dieser Abbildung (Abb. 11) ist bereits berücksichtigt, daß Wentworth die Strahlungsenergie ihres Prüflichtes am Auge gemessen hat, während in unseren Versuchen die Energie an der 1 m vom Auge entfernten weißen Kugelwand bestimmt wurde. Aus dem Entfernungsquadratgesetz ergibt sich, daß in unseren Versuchen die am Auge eintreffende Energie des Prüfreizes $(\frac{1}{100})^2$ sein muß. Dementsprechend sind in der Abb. 11 unsere Energiewerte mit dem Faktor 10^{-4} multipliziert worden.

3. Wentworth hat in ihren Versuchen den Einfluß einer wechselnden Pupillenweite ausgeschaltet, indem sie den Prüfreiz in der Pupillenebene so klein abbildete, daß das Bild des Prüfreizes bei allen Blickrichtungen einen kleineren Durchmesser als die Eintrittspupille des Auges hatte; bei unseren Kurven ist der Einfluß der sich mit der Blickrichtung ändernden Größe der Eintrittspupille nicht berücksichtigt worden.
Je weiter exzentrisch die Prüfmarke in einem horizontalen Meridian gelegen ist, um so kleiner wird der horizontale Durchmesser der Eintrittspupille, und um so kleiner die auf die Netzhaut fallende Lichtenergie. S p r i n g und S t i l e s , sowie S l o a n , haben den Minderungsfaktor bei peripherer Blicklage für das Auge bestimmt. In Abb. 11 haben wir den Einfluß dieses Minderungsfaktors zusätzlich dargestellt.

4. Die Untersuchungen von Wentworth unterscheiden sich ferner von unseren dadurch, daß sie mit einer Prüfmarke von 76 Winkelminuten ausgeführt wurden, unsere hingegen mit einer Prüfpunktgröße von 30 Minuten. D a n i e l hat Untersuchungen über den Einfluß der Prüfmarkengröße auf Lage und Form der Unterschiedsempfindlichkeitskurven mit weißem Licht durchgeführt. Dabei stellte er Unterschiede in der Höhenlage von 1/2 bis 1 Dekade bei Änderung der Prüfmarkengröße von 3o auf 6o Minuten fest.

Auch ein gewisser Einfluß auf die Kurvenform war erkennbar. Entsprechende Untersuchungen mit farbigen Prüfmarken sind unseres Wissens nicht ausgeführt worden, jedoch muß man wonl einen ähnlichen Einfluß der Reizmarkengröße annehmen. Deshalb ist bei dem Vergleich der Kurven der Einfluß der verschiedenen Prüfmarkengröße zu bedenken.

5. Schließlich ist zu beachten, daß auch individuelle Besonderheiten bei der Verschiedenheit der Kurven eine Rolle spielen. Wentworth hat nur eine Versuchsperson untersucht, wir hingegen stellten unsere Untersuchungen an drei Versuchspersonen an, die in ihren Ergebnissen zwar individuelle, aber in Form und Höhenlage keine grundsätzlichen Unterschiede zeigen (Abb. 1 - 4).
Es fällt jedoch auf, daß die Kurven von Wentworth in Abb. 10 für alle untersuchten Spektrallichter einen flacheren Empfindlichkeitsanstieg von Zentrum zur Peripherie hin zeigen als die aller unserer Versuchspersonen. Das könnten individuelle Besonderheiten sein, jedoch ist auch zu erwägen, ob nicht vielleicht auch Unterschiede in der Versuchsmethodik eine Rolle spielen, die wir aus der Arbeit von Wentworth nicht entnehmen konnten.

Der Vergleich der langwelligen Spektrallichter (672.5 nm von Wentworth mit 658.0 nm von uns) ist nur bedingt möglich, weil sich die Wellenlängen stärker unterscheiden.
Die Unterschiede in Hönenlage und Form sind hier jedoch besonders auffällig. Nach unseren Ergebnissen ist zu erwarten, daß je langwelliger das Prüflicht ist, um so weniger ausgeprägt eine zentrale Trichterbildung erkennbar wird. Wir konnten bereits bei 658.0 nm keinen zentralen Trichter mehr nachweisen, Wentworth dagegen findet noch für 672.5 nm einen ausgeprägten zentralen Trichter. Außerdem ist bei ihren Kurven der auch bei andern Wellenlängen auffällige allmähliche Anstieg der Empfindlichkeit zur

Peripherie hin hier für 672.5 nm besonders deutlich. Dieses Ergebnis von Wentworth ist mit unseren Erfahrungen nicht zu vereinbaren und läßt uns an methodische Einflüsse denken.

Alles in allem ist festzustellen, daß bei Berücksichtigung der aufgeführten Faktoren für die verglichenen Kurven eine leidliche Übereinstimmung bezüglich der Höhenlage vornanden ist, während eine sichere Erklärung für Abweichungen in der Form fehlt.

Wir haben überdies versucht, den Verlauf unserer Empfindlichkeitskurven für das dunkle Umfeld mit den Zahlen in Beziehung zu setzen, die Ø s t e r b e r g für die Verteilung von Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut angegeben hat. Dabei ließ sich jedoch, wenn man bei Dunkeladaptation für die "Blauempfindlichkeit" (453 nm) die Stäbchen und für die "Rotempfindlichkeit" (658 nm) die Zapfen verantwortlich macht, kein einfacher Zusammenhang nachweisen. Nach Ø s t e r b e r g ist die Zahl der Stäbchen am temporalen Rand des blinden Flecks bei 21.6° am größten. Genau für diese Stelle (22°) fanden wir für die dunkeladaptierte Netzhaut eine Buckelbildung der Kurven im Sinne eines Empfindlichkeitsanstiegs für die Wellenlängen 453.o, 479.o, 577.5 und 599.o.

IV. Schlußbetrachtung

Aus dem Vergleich unserer Ergebnisse mit denen von W e n t w o r t h geht hervor, daß unsere Kenntnisse über die achromatischen Schwellenenergien noch nicht ausreichend sind, so daß eine Perimetrie mit farbigen Lichtern auf dieser Basis vorläufig noch der notwendigen wissenschaftlichen Grundlage entbehrt.
Die methodischen Schwierigkeiten sind vielfältig und noch nicht gelöst. Es müssen weitere Grundlagen mit gleichartiger Methodik erarbeitet werden.

Dennoch scheinen uns die vorliegenden Untersuchungen einige wichtige Ergebnisse erbracht zu haben:

- Die Unterschiede zwischen der achromatischen Empfindlichkeit von Netzhautzentrum und -peripherie sind beträchtlich und systematischer Art. Es erscheint uns deswegen nicht gerechtfertigt, bei der Feststellung der spektralen Netzhautempfindlichkeit diese Unterschiede unberücksichtigt zu lassen, wie es bei den V_λ -Kurven geschehen ist.

Systematische Unterschiede haben wir in folgenden drei Punkten festgestellt:

- Die Unterschiede der Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Wellenlängen sind im Netzhautzentrum bei der Dunkeladaptation größer als bei Helladaptation; sie sind am langwelligen und kurzwelligen Spektralende etwa gleich.
- In der Netzhautperipherie gilt dies für das kurzwellige Spektralende in geringem Maße, für das langwellige Spektralende dagegen sehr ausgeprägt.
- Für ein und dieselbe Wellenlänge nimmt der Unterschied in der Empfindlichkeit von Netzhautzentrum und -peripherie bei Helladaptation nach dem langwelligen, bei Dunkeladaptation nach dem kurzwelligen Ende hin zu. Diese systematische Änderung der Empfindlichkeitsunterschiede geschieht im Hellen durch eine relative Empfindlichkeitszunahme des Netzhautzentrums gegenüber der Peripherie, im Dunklen hingegen durch eine relative Empfindlichkeitszunahme der Netzhautperipherie gegenüber dem Netzhautzentrum.

E. Zusammenfassung

Mit der Methode der statischen Perimetrie wurden die achromatischen Schwellen des horizontalen Netzhautmeridians dreier Versuchspersonen bei drei Adaptationszuständen (10, 0.1 und 0 asb) für sieben monochromatische Reizlichter bekannter Energie bestimmt.
Es konnte gezeigt werden, daß die Unterschiede zwischen der achromatischen Empfindlichkeit von Netzhautzentrum und Peripherie beträchtlich und systematischer Art sind:

1. Die Unterschiede in der Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Wellenlängen sind im Netzhautzentrum bei Dunkeladaptation größer als bei Helladaptation und am kurzwelligen und langwelligen Ende des sichtbaren Spektralbereichs etwa gleich.
2. Die Netzhautperipherie zeigt gegenüber Spektrallichtern des kurzwelligen Spektralbereiches nur eine in geringem Maße unterschiedliche Empfindlichkeit, jedoch sehr ausgeprägte Empfindlichkeitsunterschiede für Lichtreize des mehr langwelligen Spektralendes.
3. Bestimmt man den Unterschied in der Empfindlichkeit von Netzhautzentrum und Peripherie für eine bestimmte Wellenlänge, so findet man, daß er bei langwelligen Lichtern mit zunehmender Helladaptation - bei kurzwelligen Lichtern mit zunehmender Dunkeladaptation größer wird.
4. Diese systematische Änderung der Empfindlichkeitsunterschiede geschieht im Hellen durch eine relative Empfindlichkeitszunahme des Netzhautzentrums gegenüber der Peripherie, im Dunklen jedoch durch eine relative Empfindlichkeitszunahme der Netzhautperipherie gegenüber dem Netzhautzentrum.

L i t e r a t u r

ABNEY u. WATSON .... The Threshold Vision for Different Color Lights.
Philos.Trans.A, 216, 91, 1916

ARMINGTON, C. .... Amplitude of Response and Relation to Spectral Sensivity of the Human Eye.
J.Opt.Soc.Am.45, 1085, 1955

BERK, M.M. .... A Critical Evaluation of Color Perimetrie.
A.M.A. Arch.Ophth. 63,960, 1960

BOUMY, P.J. .... Farbe und Farbwahrnehmung.
Philips Techn.Bibliothek, 1951

DANIEL, K. .... Der Einfluß der Reizmarkengröße auf die Lichtunterschiedsempfindlichkeit der Netzhaut bei verschiedenen Adaptationszuständen.
Dissertation Tübingen

DUBOIS-POULSEN, A. .... Le champ visuel.
Edit.Masson et C^{ie}, Paris, 1952

FERREE und RAND .... The Absolute Limits of Color Sensitivity and the Effect of Light on the Apparent Limits.
Psychol.Rev. 27, 1, 1920

dieslb. .... Size of Stimulus and Brightness of Preexposure and of Surrounding Field in Relation to the Extent and Shape of the Color Fields.
J.gen.Psychol. 4, 15, 1930

FERREE, RAND u.WENTWORTH .... The Blind Spot for Achromatic and Chromatic Stimuli.
Am.J.Ophth. 8, 620, 1925

FRANCOIS u. VERRIEST .... Nouvelle contribution a l'étude du scotom central à l'obscur chez les sujets normales.
Ann. d'Ocul. 186, 695, 1953
" " 1013, 1953

FRIEDRICH u. SCHREIBER .... Die Extrafovealen Schwellenwerte für 365 und 546 nm. Pflüg.Arch. 246,621,1943

GROSS, K. .... Über Farbenempfindung in der Netzhautperipherie. Z.f.Sinnesphysiol.62,44,1931

GURGIAN, A.A. .... Of the Adaptation of the Light and Color Sensitive Apparatus of Vision. Dokl.Akad.Nauk.SSSR, 107, 405, 1956. Ref. Zbl.f. Ophthalm.69, 207, 1956

HARMS, H. .... Die Verteilung des Lichtsinnes in der Netzhaut. Klin.Mbl.f.Augenhk. 4.Heft 112, 1947

desgl. .... Die Adaptationsprüfungen bei gleichbleibender Lichtempfindlichkeit des Auges. Sonderabdruck aus dem Bericht über die 55.Zus.kft d. Dtsch. Ophthalm.Gesellsch.Heidelberg 1949

desgl. .... Räumliche Darstellung des Gesichtsfeldes. Sonderabdruck aus dem Bericht über die 56.Zus.kft d. Dtsch. Ophthalm.Gesellsch. München 1950

desgl. .... Entwicklungsmöglichkeiten der Perimetrie. v.Graef.Arch.f.Ophthalm. 150, 28, 1950

desgl. .... Die praktische Bedeutung der quantitativen Perimetrie. Klin.Mbl.f.Augenhk. 121, 683, 1952

desgl. .... Neue Methoden der Perimetrie. Aus Zeitfragen der Augenheilkunde von 1954. Verh. G. Thieme Verlag Leipzig

HARMS u. AULHORN .... Vergleichende Untersuchungen über den Wert der quantitativen Perimetrie,Skiaskotometrie und Verschmelzungsfre-

quenz für die Erkennung beginnender Gesichtsfeldstörungen beim Glaukom.
Doc.ophthalmologica XIII, 303.

HARTRIDGE, H. .... Proceedings of the Physiological Society 18. Jan. 1947.
J.of Physiol. 106,S.5 P, 1947

v.KRIES .... Über die Farbenblindheit der Netzhautperipherie.
Z.f.Psychol.u.Physiol.d.Sinnesorgane. 15, 247, 1897

v.KRIES u. BREUER .... Über die absolute Empfindlichkeit der verschiedenen Netzhautteile in dunkeladaptiertem Auge.
Z.f.Psych.u.Physiol.d.Sinnesorgane. 15, 247, 1897

v.KRIES u. EYSTER .... Über die zur Erregung des Sehorgans erforderlichen Energiemengen.
Z.f.Sinnesphysiol. 41,373,1907

LOMBARD, G. .... Essai de formulation simple des seuils chromatiques pour le bleu et le jaune.
Ann.d'Ocul. 118, 367, 1959

LYTHGOE, R. .... Dark Adaptation and the Peripheral Color Sensation of Normal Subjects.
Brit.J.Ophthalm. 15, 193, 1931

MANZ, G. .... Der Einfluß des Adaptationszustandes auf die Netzhautempfindlichkeit bei Verwendung verschiedener Prüfmarkengrößen.
Dissertation Tübingen.

MATSUBARA, S. .... Messende Untersuchungen über den Einfluß der Dunkeladaptation auf die Wahrnehmung spektraler Lichter.
Acta jap.ophthalm. 39, 1406,1935

MERTENS, J.J. .... Influence of Knowledge of Target Location upon the Probability of Observation of Periphally Observable Flashes.
J.Opnth.Soc.Am. 46,1069,1956

MEYER-GEHLEN, H. .... Schwankungen in der Lichtunterschiedsempfindlichkeit gesunder Augen.
Dissertation Tübingen.

MEYER u. MOERDER .... Spiegelgalvanometer und Lichtzeigerinstrumente.
Techn.Physik.Monogr. LIV, 1952

MONJÉ, M. .... Über die Farbempfindlichkeit der zentralen und peripheren Netzhautbezirke bei verschiedenen Adaptationszuständen.
Die Farbe, 4, 223, 1955

desgl. .... Über die Abhängigkeit der Empfindlichkeit für farbige Reize im Gesichtsfeld des nicht farbentüchtigen Auges.
Klin.Mbl.Augenhk. 132, 635, 1958

desgl. .... Über die Ausdehnung des stäbchenfreien Bezirks der Netzhautmitte und dessen Empfindlichkeit für Farbreize.
Pflüg.Arch. 268, 390, 1959

MONROE, M.M. .... The Energy Value of the Minimum visibile Chromatic and Achromatic for Different Wave-Lengths of the Spectrum.
Psychol.Monogr.1925, 34,(5) Nr.158 (Dissertation)

MOTOKAWA, K. .... Retinal Process and their Role in Color Vision.
J.of Neurophysiol. 12,291 u.465, 1949

ØSTERBERG, G. .... Topography of the Layer of Rods and Cones in the Human Retina.
Acta ophthalm.,Suppl.6,1935

PARKE, G. .... Erfassung der individuellen Verschiedenheiten der Funktion der Netzhaut im zentralen Gesichtsfeld von 2o gesunden Versuchspersonen.
Dissertation Tübingen

SAUGSTADT, P. u.SAUGSTADT,A. The Duplicity Theory. An Evaluation.
Fortschr.d.Augenhk. IX, 1, 1959

SCHOBER, H. .... Ein neues Weiß- und Farbenkampimeter mit einem auch zur Schielprüfung geeigneten Schirm. Klin.Mbl.Augenhk. 115, 149, 1949

Fa. SCHOTT & Gen. .... Interferenzfilter. Katalog Nr. 302

dies. .... Farb- und Filterglas für Wissenschaft und Technik, 1959 (Katalog)

SLOAN, L.L. .... The Effect of Intensity of Light, State of Adaptation of the Eye, and Size of the Photometric Field on the Visibility Curve. Psychol.Monogr. 1928,38, (1),Nr.173

desgl. .... Instruments and Technics for Clinical Testing of Light Sense. III. An Apparatus for Studiing Regional Differences in Light Sense. Arch.Ophthalm. (Am.) 22,233,1939

desgl. .... The Threshold Gradients of the Rods and the Cones: In the Dark-adapted and in the Partially Light-adapted Eye. Am.J.Ophth. 33, 1077, 1950

SMITH KINNEY, J.A. .... Sensivity of the Eye to Spectral Radiation at Scotopic and Mesopic Intensity Levels. J.Opt.Soc.Am. 45, 507, 1955

SPRING u. STILES .... The Apparent Shape and Size of Pupil Viewed Obliquely. Brit.J.Ophthalm. 32, 347, 1948

STILES, W.S. .... Increment Threshold and the Mechanisms of Color Vision. Doc.ophthalmologica III, 138, 1949

WENTWORTH, H.A. .... A Quantitative Study of Achromatic and Chromatic Sensitivity from Center to Periphery of the Visual Field Psychol.Monogr. 1930,40 (3),Nr. 183 (Dissertation)

WRIGHT, W.D. .... The Present Status of the Trichromatic Theory. Doc.ophthalmologica III, 1o, 1949

ZANEN, L. .... Les Seuils achromatiques chez certains affections du nerf optique. Bull.Memb.Soc.Franc.Ophth. 69,437, 1956

ZANEN u. MEUNIER .... Les seuils achromatiques fovéaux dans la sklerose en plaques. Bull.Memb.Soc.Franc.Ophth. 71, 95 1958

ZANEN, SCUCS u. PIRART .... Les seuils achromatiques dans le diabète. Bull.Soc.Belge Ophth. 115, 210,1957

G. ANHANG MIT DEN ABBILDUNGEN

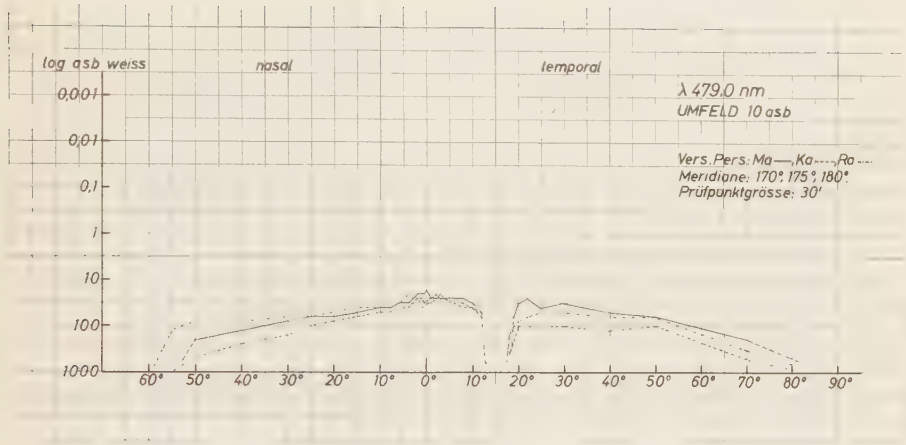


Abb. 1

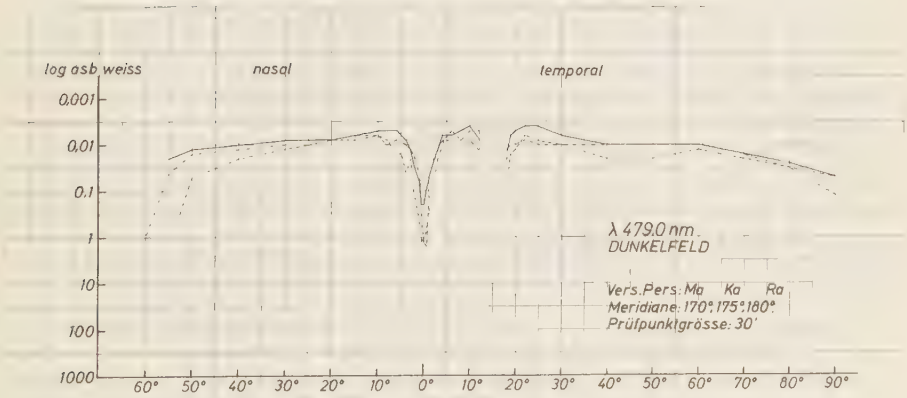


Abb. 2

Abb. 1 - 4: Beispiele für die Variationsbreite der drei Versuchspersonen

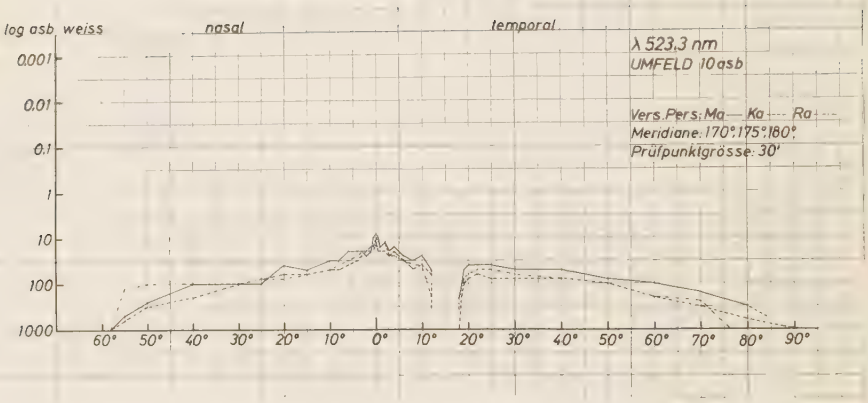

log asb weiss
nasal
temporal
λ 523,3 nm
UMFELD 10 asb
Vers. Pers.: Ma Ka Ra
Meridiane: 170°, 175°, 180°
Prüfpunktgrösse: 30'
0.001
0.01
0.1
1
10
100
1000
60° 50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°

Abb. 3

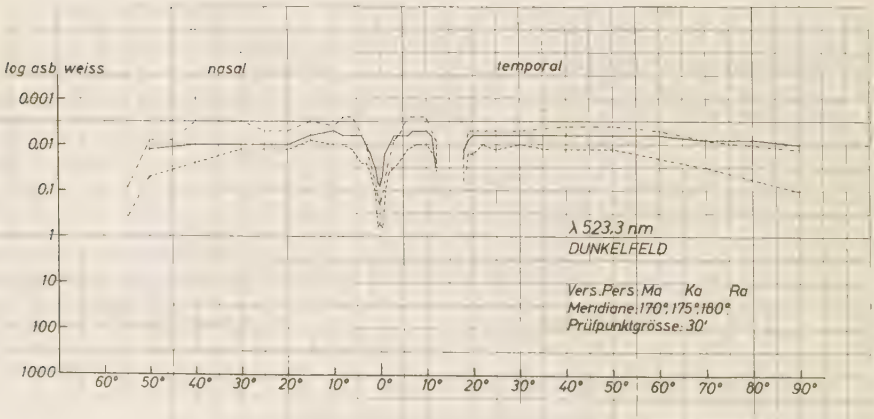
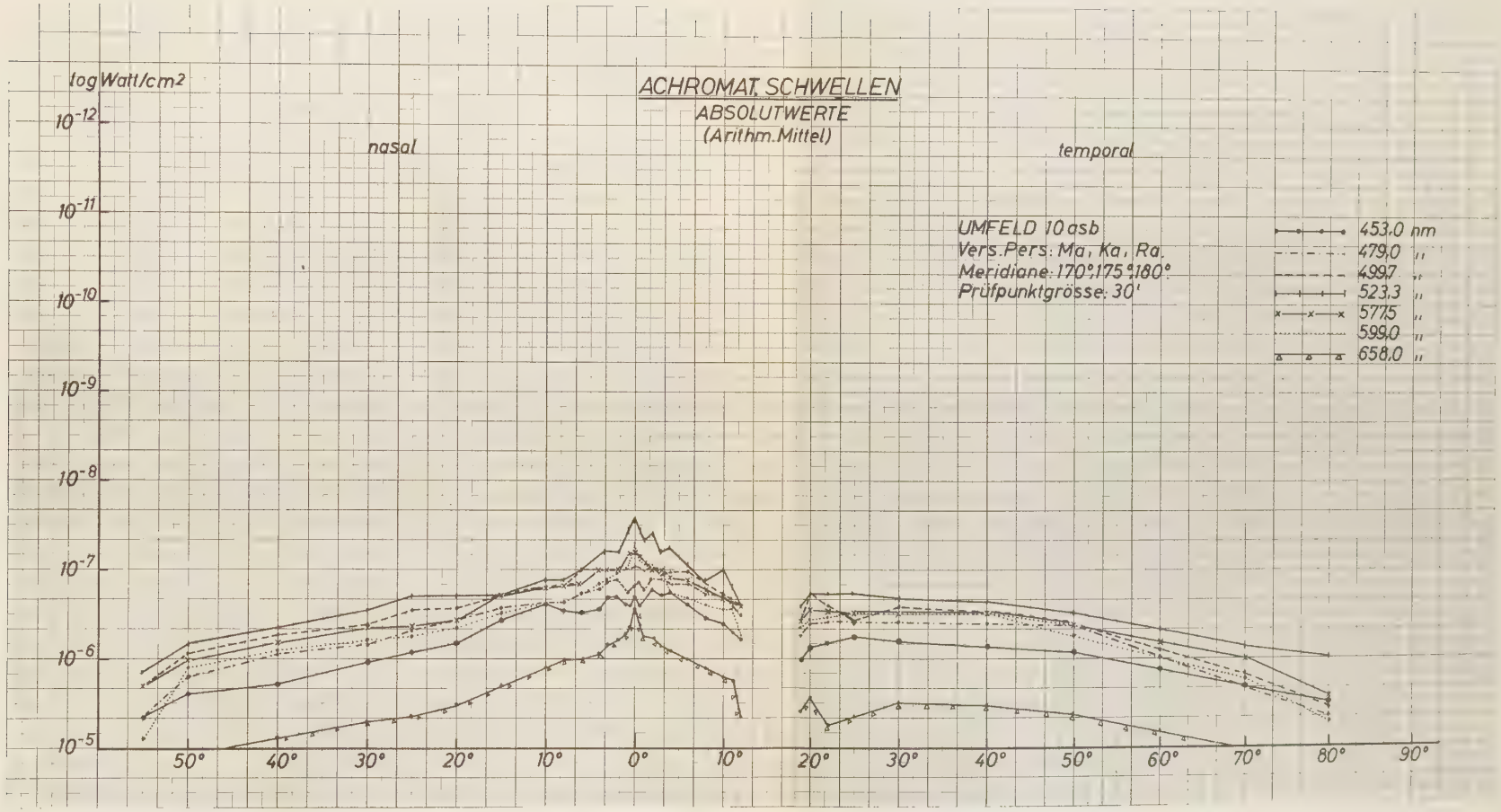
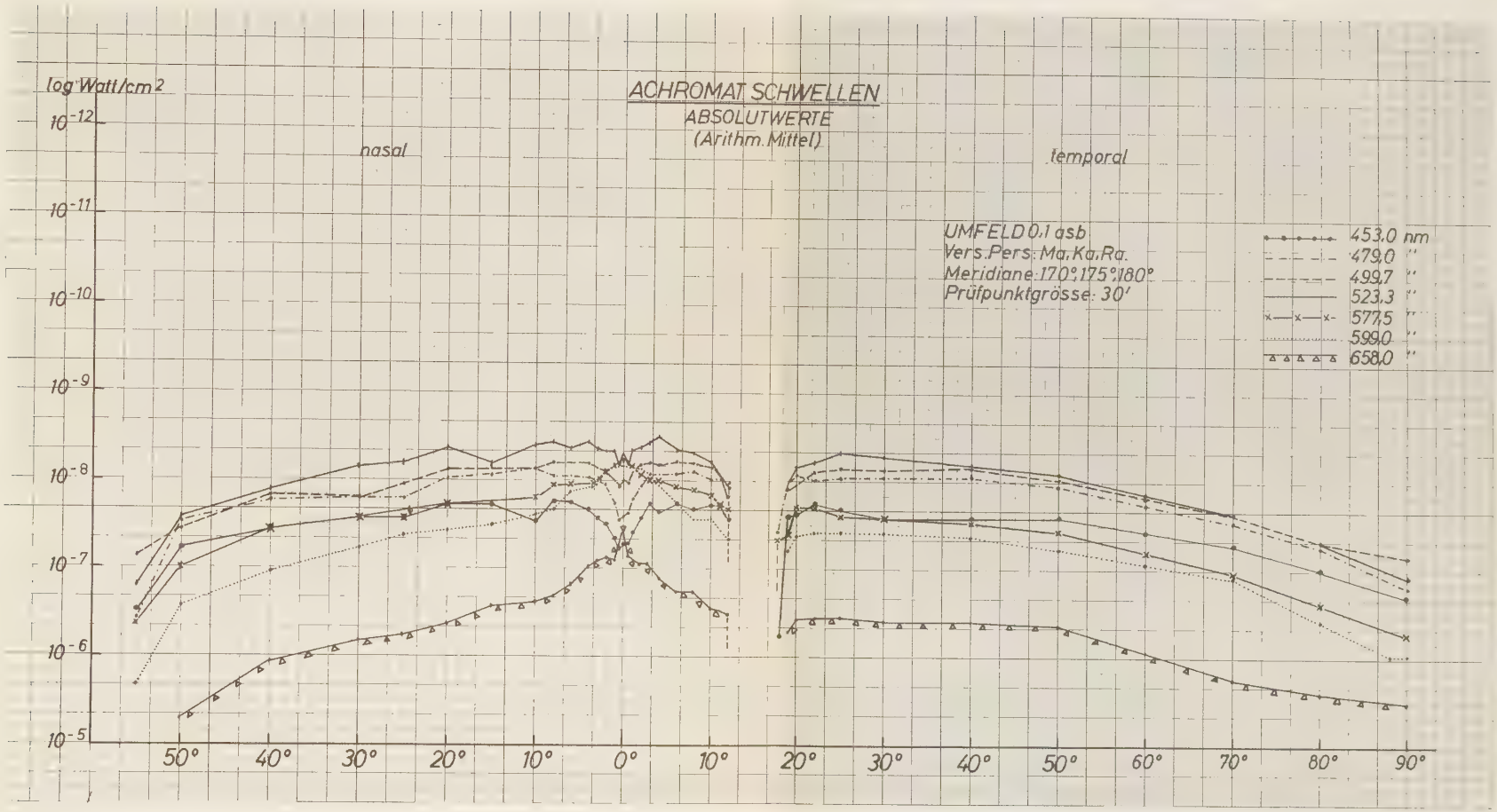
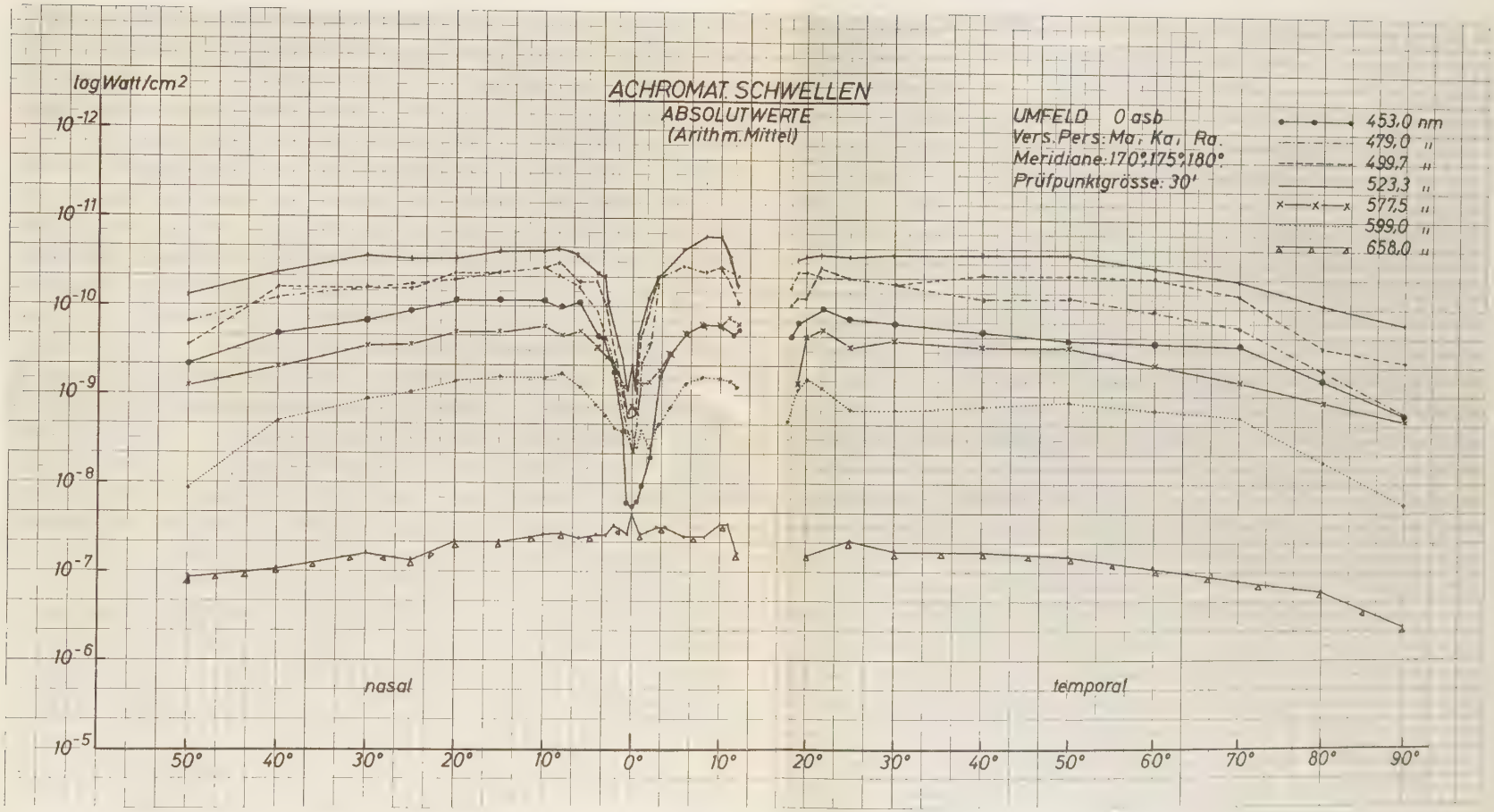
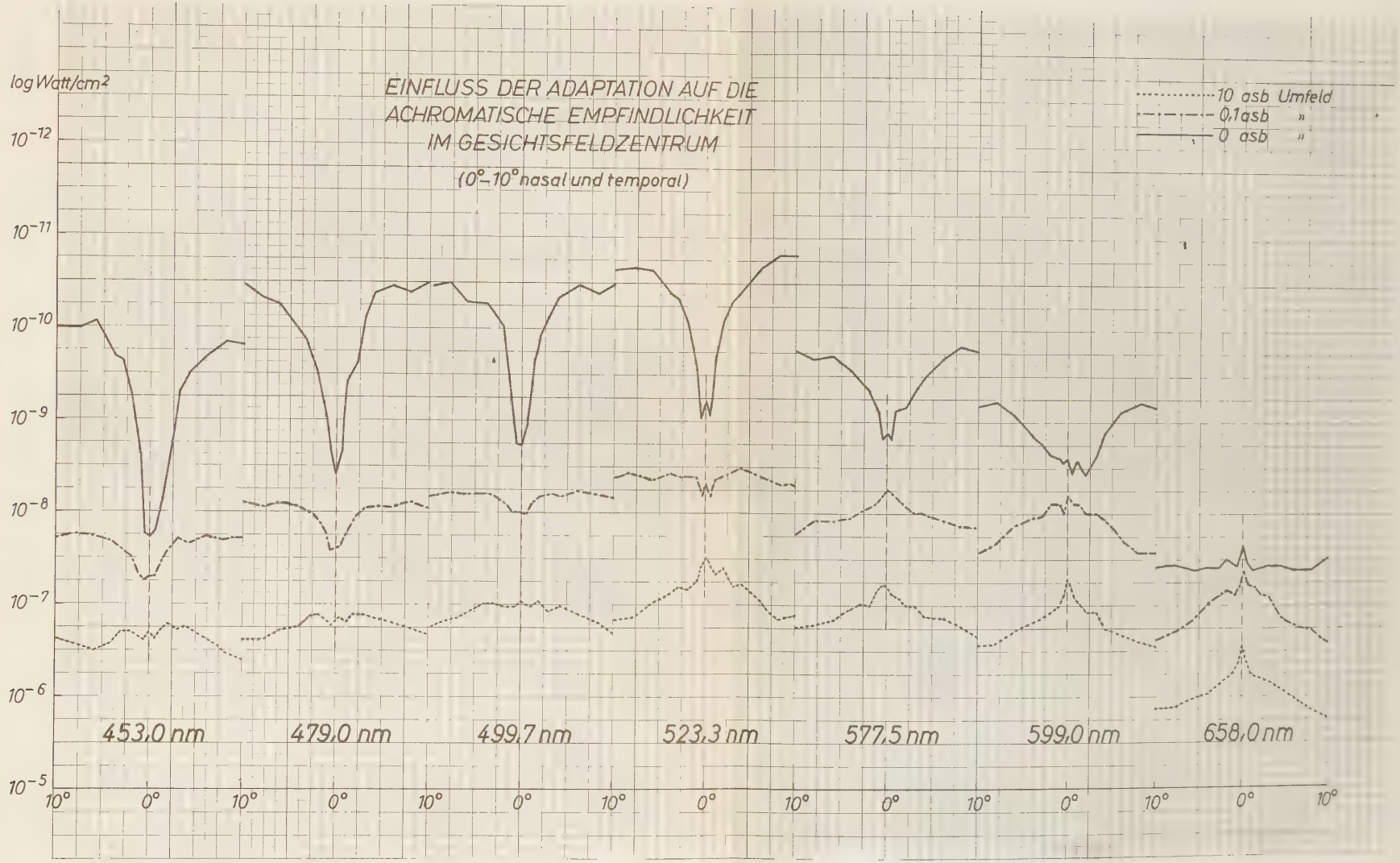

log asb weiss
nasal
temporal
λ 523.3 nm
DUNKELFELD
Vers. Pers.: Ma Ka Ra
Meridiane: 170°, 175°, 180°
Prüfpunktgrösse: 30'
0.001
0.01
0.1
1
10
100
1000
60° 50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°

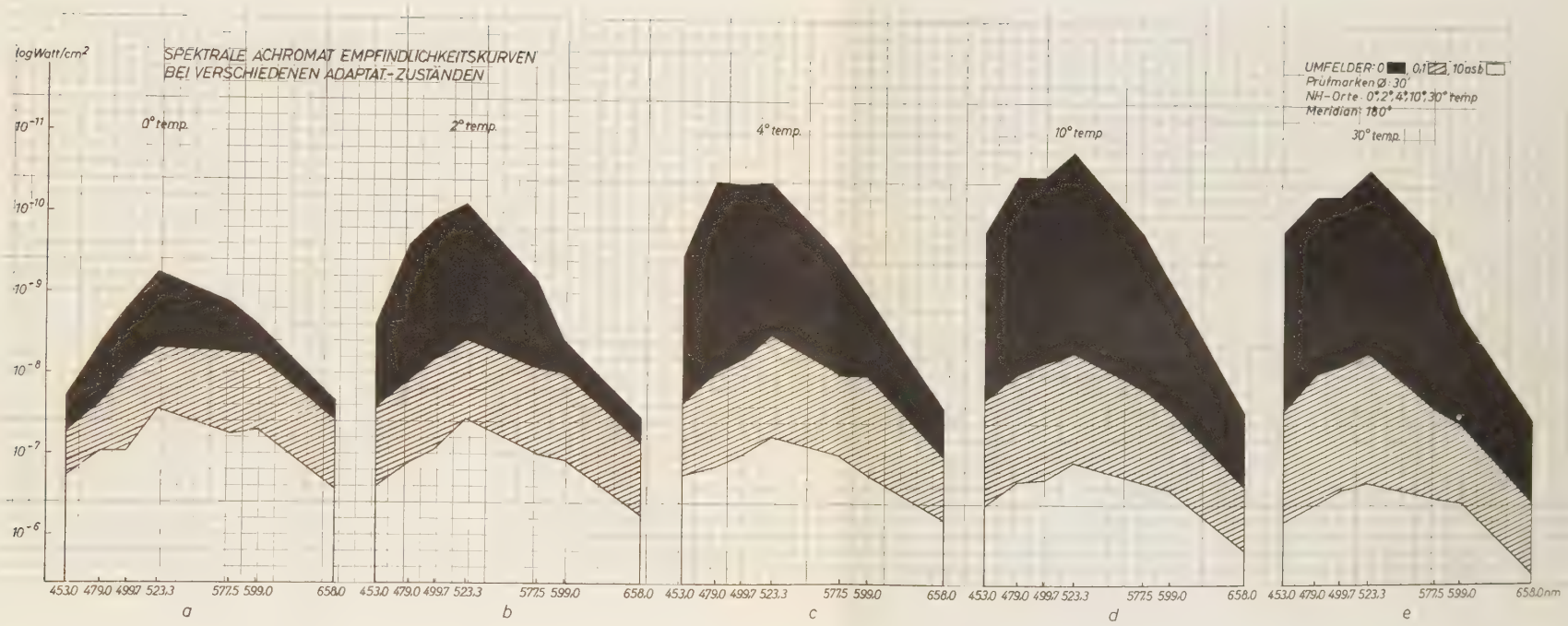
Abb. 4

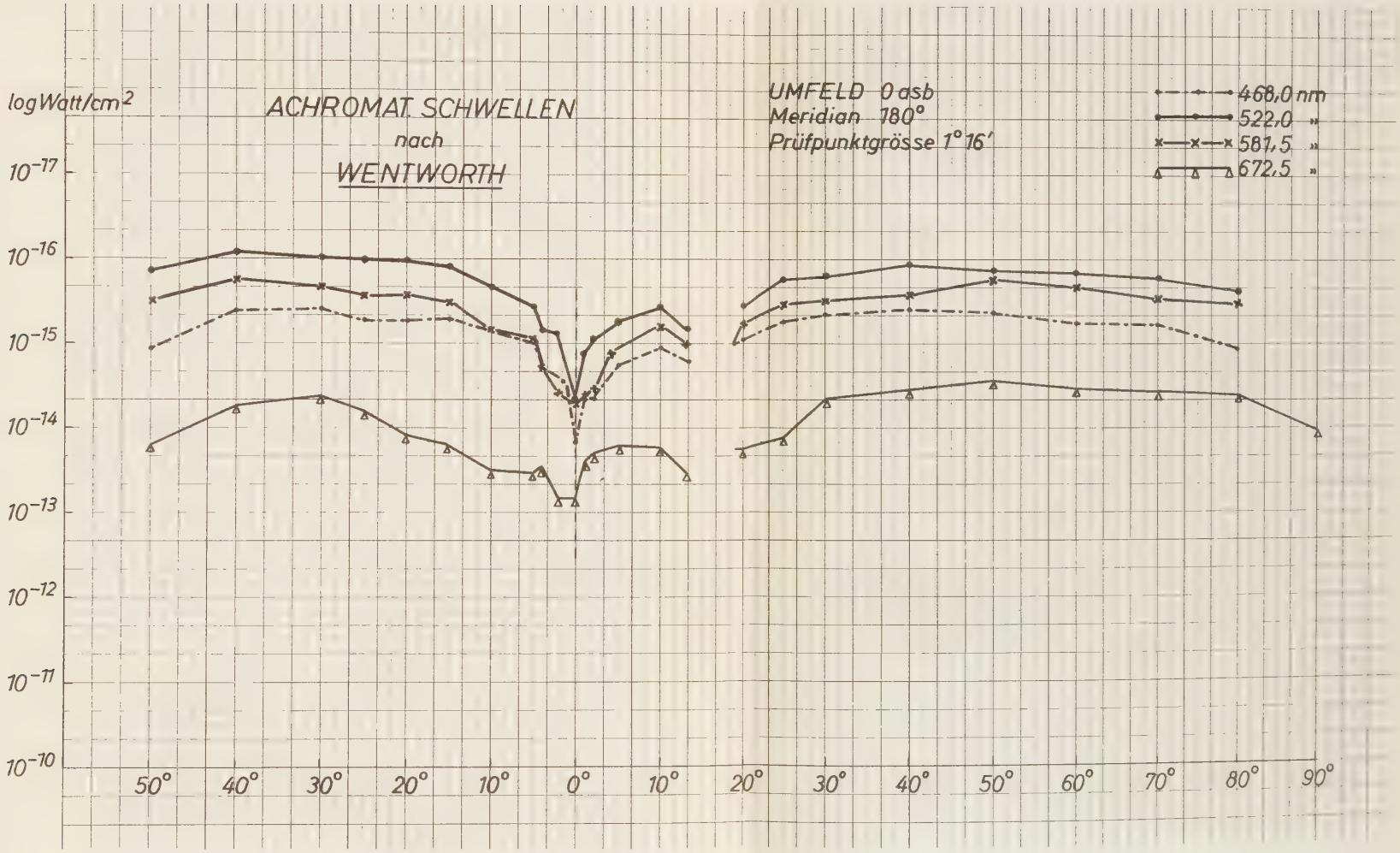

log Watt/cm²
ACHROMAT. SCHWELLEN
ABSOLUTWERTE
(Arithm. Mittel)
nasal
temporal
UMFELD 10 asb
Vers. Pers.: Ma, Ka, Ra.
Meridiane: 170°;175°;180°
Prüfpunktgrösse: 30'
453.0 nm
479.0 "
499.7 "
523.3 "
577.5 "
599.0 "
658.0 "
10⁻¹²
10⁻¹¹
10⁻¹⁰
10⁻⁹
10⁻⁸
10⁻⁷
10⁻⁶
10⁻⁵
50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°

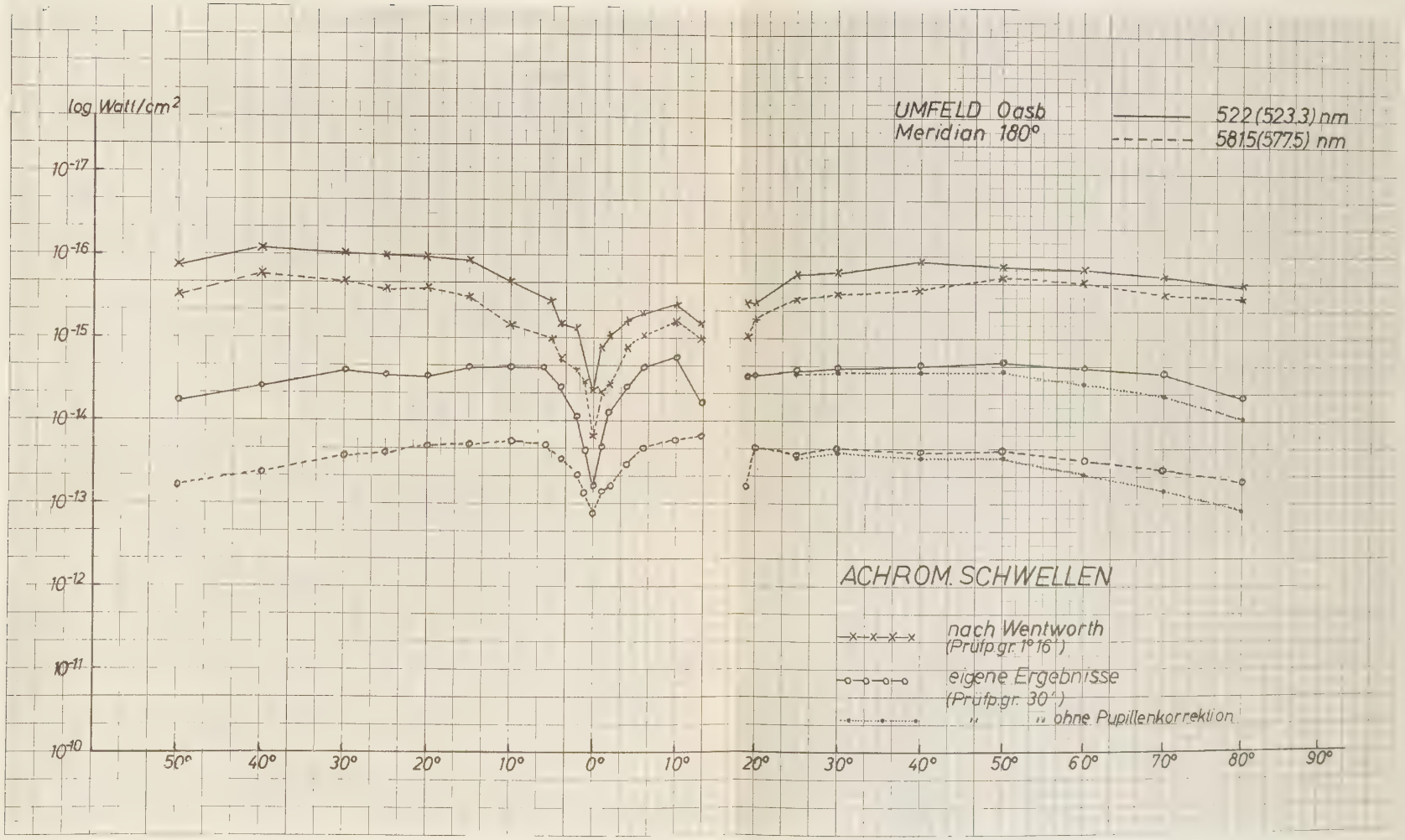

log Watt/cm 2
ACHROMAT SCHWELLEN
ABSOLUTWERTE
(Arithm. Mittel)
nasal
temporal
UMFELD 0,1 asb
Vers. Pers.: Ma, Ka, Ra.
Meridiane: 170°, 175°, 180°
Prüfpunktgrösse: 30'
453,0 nm
479,0 "
499,7 "
523,3 "
577,5 "
599,0 "
658,0 "
10-12
10-11
10-10
10-9
10-8
10-7
10-6
10-5
50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°


log Watt/cm²
ACHROMAT. SCHWELLEN
ABSOLUTWERTE
(Arithm. Mittel)
UMFELD 0 asb
Vers. Pers.: Ma, Ka, Ra.
Meridiane: 170°, 175°, 180°
Prüfpunktgrösse: 30'
453,0 nm
479,0 "
499,7 "
523,3 "
577,5 "
599,0 "
658,0 "
10⁻¹²
10⁻¹¹
10⁻¹⁰
10⁻⁹
10⁻⁸
10⁻⁷
10⁻⁶
10⁻⁵
nasal
temporal
50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°


log Watt/cm²
EINFLUSS DER ADAPTATION AUF DIE
ACHROMATISCHE EMPFINDLICHKEIT
IM GESICHTSFELDZENTRUM
(0°–10° nasal und temporal)
10 asb Umfeld
0,1 asb "
0 asb "
10⁻¹²
10⁻¹¹
10⁻¹⁰
10⁻⁹
10⁻⁸
10⁻⁷
10⁻⁶
10⁻⁵
453,0 nm
479,0 nm
499,7 nm
523,3 nm
577,5 nm
599,0 nm
658,0 nm
10° 0° 10° 0° 10° 0° 10° 0° 10° 0° 10° 0° 10° 0° 10°


log Watt/cm²
SPEKTRALE ACHROMAT EMPFINDLICHKEITSKURVEN
BEI VERSCHIEDENEN ADAPTAT.-ZUSTÄNDEN
UMFELDER: 0, 0,1, 10 asb
Prüfmarken Ø: 30'
NH-Orte: 0°, 2°, 4°, 10°, 30° temp
Meridian: 180°
0° temp.
2° temp.
4° temp.
10° temp
30° temp.
10⁻¹¹
10⁻¹⁰
10⁻⁹
10⁻⁸
10⁻⁷
10⁻⁶
453.0 479.0 499.7 523.3 577.5 599.0 658.0
453.0 479.0 499.7 523.3 577.5 599.0 658.0
453.0 479.0 499.7 523.3 577.5 599.0 658.0
453.0 479.0 499.7 523.3 577.5 599.0 658.0
453.0 479.0 499.7 523.3 577.5 599.0 658.0nm
a
b
c
d
e


log Watt/cm²
ACHROMAT. SCHWELLEN
nach
WENTWORTH
UMFELD 0 asb
Meridian 180°
Prüfpunktgrösse 1° 16'
468,0 nm
522,0 »
581,5 »
672,5 »
10⁻¹⁷
10⁻¹⁶
10⁻¹⁵
10⁻¹⁴
10⁻¹³
10⁻¹²
10⁻¹¹
10⁻¹⁰
50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°


log Watt/cm²
10⁻¹⁷
10⁻¹⁶
10⁻¹⁵
10⁻¹⁴
10⁻¹³
10⁻¹²
10⁻¹¹
10⁻¹⁰
50° 40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° 70° 80° 90°
UMFELD Oasb
Meridian 180°
522 (523.3) nm
5815 (577.5) nm
ACHROM. SCHWELLEN
nach Wentworth
(Prüfp.gr. 1° 16')
eigene Ergebnisse
(Prüfp.gr. 30')
" " ohne Pupillenkorrektion

Für das Vertrauen, das mir Herr Professor Dr. med. Heinrich H a r m s durch die Überlassung des Themas bewies, für die freundliche, hilfsbereite und tatkräftige Unterstützung und Beratung möchte ich von Herzen danken.

Frau Priv.Doz.Dr. med. E. A u l h o r n sei ebenfalls für die mir stets entgegengebrachte Hilfsbereitschaft herzlichst gedankt.

L e b e n s l a u f

Als Sohn des Kaufmanns Adolf Nolte und seiner Ehefrau Hedwig, geb. Hilger, wurde ich, Wilhelm Nolte, am 24. Juli 1934 in Göttingen geboren.

Zu Ostern 1940 wurde ich in die Bonifatius-Volksschule Göttingen eingeschult. Im Jahre 1944 trat ich in das damalige Staatl. Gymnasium, jetzt Max-Planck-Gymnasium in Göttingen ein. 1953 wechselte ich die Schule und bestand am Gymnasium in Duderstadt im März 1955 die Reifeprüfung.

Mein Medizinstudium begann ich im Sommersemester 1955 an der Universität Göttingen, wo ich im Juli 1957 die ärztliche Vorprüfung ablegte. Nach je einem klinischen Semester an den Universitäten in West-Berlin und in Kiel wurde ich zum Wintersemester 1958/59 an der Universität Tübingen immatrikuliert. Dort bestand ich im Dezember 1960 das Medizinische Staatsexamen.

Tübingen, April 1962